

Parametric 音源의 魚探利用에 關한 考察

李 雲 熙 · 張 志 元

釜山水產大學
(1987년 10월 31일 접수)

Application of Parametric Acoustic Source to Fish Finding

Woon Hee LEE and Jee Won CHANG

National Fisheries University of Pusan

(Received October 31, 1987)

As the basic research for the application of a parametric acoustic source to fish finding, the characteristics of beam patterns and parametric gains of the acoustic source were investigated and target strengths of fish, grey mullet, with the acoustic source were measured.

The mean primary frequency of the acoustic source was 200 KHz and the produced sounds by difference-frequencies were 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz and 20 KHz.

For measurement of target strength in yaw (coronal) plane of fish the to be target was 34 cm in length, the pulse duration of the source was 0.3 msec and the difference frequency was 10 KHz in consideration of the length of fish and of parametric gain of the acoustic source.

The results obtained are as follows:

1. Beam widths(down 3 dB) of the parametric acoustic source excited at frequencies of 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz, and 20 KHz were 4.3°, 2.2°, 3.0° and 2.5° respectively.
2. Parametric gains of the parametric acoustic source excited at frequencies of 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz and 20 KHz were -41 dB, -45 dB, -60 dB and -68 dB respectively.
3. Target strengths of a fish in head and tail aspect using the parametric acoustic source were 5 dB lower than those using 200 KHz single frequency sound, but those in side aspect were similar.
4. Target strengths of two or three fish with the parametric acoustic source were 1-3 dB lower than those in head and tail aspect using 200 KHz single frequency sound.

緒 言

電波를 利用할 수 없는 水中에서 生物의 位置나 性을 알아내기 위하여는 音波를 放射하여 그 物體로부터 反射되는 反射波를 檢出하는 sonar 技術에 依存하지 않을 수 없다. 이 sonar 技術이란 주로 音波의 放射와 目標物로부터의 反射波 檢出에 關한 것이며, 이때 音波의 傳播는 대부분 線形性을 갖는다고 假定하고 있다.

水中에서 大部分의 경우 音波는 電氣音響變換器를 거쳐서 放射되는데 어떤 音波의 指向性 利得과 beam

pattern은 電氣音響變換器의 開口面積과 그 音波의 周波數에 밀접한 關係가 있다. 즉 直徑이 D인 피스톤型 電氣音響變換器의 指向指數(Directivity Index)는 音波의 波長을 λ 라 하면 $DI=10 \log(\pi D/\lambda)^2$ 이다¹⁾.

따라서 變換器의 開口面積이 주어지면 指向性 利得은 音波의 周波數에 의하여 決定되며 이때 좁은 beam 幅으로 方位 分解能을 높이려면 周波數를 높여야 한다. 그러나 音壓의 減衰는 周波數의 제곱에 比例하므로 高周波의 音波를 利用하면 探知距離가 그만큼 짧아진다. 일정한 探知距離를 維持하기 爲하

어는 使用音波의 周波數를 적당히 낮추어야 하며 이때 高方位分解能을 얻으려면 變換器의 開口面積을 크게 해야 하므로 이러한 問題點을 改善하려는 研究가 아직도 繼續되고 있다.

1960年代初 P.J. Westervelt 는²⁾ 高周波의 두 音波를 같은 軸에서 동일한 方向으로 放射하면 音波間의 相互作用으로 인하여 銳利한 beam 幅을 갖는 差周波數의 音波가 發生한다는 것을 理論化했으며, 이 理論은 J.L.S. Bellin 과 R.T. Beyer³⁾에 의하여 實驗적으로 證明되었다. 이 parametric array 理論은 좁은 開口面積으로 銳利한 beam 幅을 갖는 低周波音源의 實現을 可能케 했으며, 또한 水中에서 媒質의 非線形 効果는 縱型 array 와 같은 役割을 하므로 副葉이 거의 없는 좋은 特性의 音源을 얻을 수 있다.

이 parametric array 를 送波에 利用하려는 研究는 1970年代 初부터 美國海軍 研究所의 Konrad, Moffet, Mellen 등에⁴⁾ 의하여 繼續되고 있으며 1970年代 中半부터는 Kritz(Sperry), Petterson(Simrad) 등⁵⁾ 製作社 研究陣도 應用研究에 主力하고 있다. 1980年代 初부터는 日本에서도 兵藤, 中村 昭, 竹内俱佳 등⁶⁾ 의하여 parametric array 의 優秀한 點을 活用하려는 實用研究가 進行되고 있으며 現在 이를 航法, 地層探査, 水中通信, 觀測 등에 活用하려는 研究가 世界各國에서 進行되고 있는 實情이다.^{7,8)}

이 parametric 音源을 魚探에 利用하면 方位 分解能이 높은 것은 물론 探知距離도 길게 할 수 있으므로 垂直魚探 및 水平魚探에 그 效果가 클 것으로 期待되어 本 研究에서는 二周波 驅動方法中 複合型 parametric 音源의 特性을 調査한 後 이를 利用하여 魚體의 各 部分에 對한 標의 強度를 測定하였다.

또 個體數가 增加할 때 標의 強度의 增加를 200 kHz 의 單一周波數 音源의 것과 比較·考察하고 parametric 音源의 魚探利用 可能性에 對하여 檢討해 보 고자 한다.

理 論

M. J. Lighthill 의 流體運動 方程式은 式(1)과 같고, 여기서 流體의 粘性을 無視하고 壓力 P 에 對하여 整理하면 式(2)와 같다.

$$(\partial^2 \rho / \partial t^2) - Co^2 \nabla^2 \rho = -Co^2 \square^2 \rho = (\partial^2 / \partial x_i \partial x_j) T_{ij} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - Co^2 \rho \delta_{ij} + D_{ij}$$

D_{ij} : the viscous stress

$$\square^2 \equiv \nabla^2 - (1/Co^2)(\partial^2 / \partial t^2) ;$$

D^2 Alembertian operator

ρu : Instantaneous Reynolds stress tensor

P_{ij} : Compressive stress tensor

δ_{ij} : Kronecker's delta

$$\square^2 P = (\partial^2 / \partial t^2)(\rho - Co^{-2}P) - (\partial^2 / \partial x_i \partial x_j) \rho u_i u_j \quad (2)$$

式(2)를 差周波數 音波에 對한 方程式으로 고쳐 쓰면 式(3)과 같고 式(3)을 整理하여 Westervelt 는 音波間의 Parametric 相互作用을 說明하기 위하여 式(4)와 같은 音波方程式을 完成하였다.

$$\square^2 P_s = -\rho_0 (\partial q / \partial t) \quad (3)$$

$$\text{여기서 } q = \rho_0^{-2} Co^{-4} \left[1 + \frac{1}{2} \rho_0 Co^{-2} (d^2 p / d\rho^2) \rho \right. \\ \left. = \rho_0 \right] (\partial / \partial t) P_i^2$$

P_i : 1次波의 音壓

P_s : 差周波數 音波의 音壓

$$\square^2 P_s = -\frac{\beta}{\rho_0 Co^4} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P_i^2 \quad (4)$$

여기서 $\beta = 1 + \frac{1}{2} \frac{B}{A}$: 非線形 parameter

本 實驗에서 音波의 放射가 Fig. 1과 같으므로 이 音波方程式을 Fig. 1의 座標系에서 풀이하면 式(5)와 같다.

$$P_s(R, \theta) = \frac{\beta W s^2 P_1 P_2 S_0}{8\pi R_0 \rho_0 Co^4} \frac{1}{[\alpha^2 + Ks^2 \sin^4(\theta/2)]^{1/2}} \quad (5)$$

여기서 α : 1次波의 吸收減衰係數

$P_{1,2}$: 1, 2次波의 音壓

Ks : 差周波數 音波의 波數

S_0 : 1次波 beam 의 斷面積

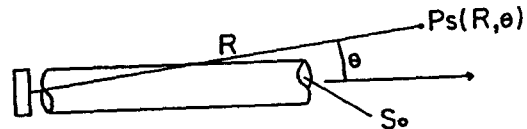


Fig. 1. The geometry for the solution of eq. (4).

裝置 및 方法

1. 實驗裝置

Parametric 音源의 特性을 調査하고 이를 利用하여 魚體의 標의 強度를 測定하기 위한 送受波 裝置의 系統圖는 Fig. 2와 같다.

本 實驗에 使用된 parametric 音源의 驅動方法은 二周波 驅動의 複合型으로 두 周波數를 電氣적으로 加算하기 위한 adder 의 回路圖는 Fig. 3과 같다. 여기서 使用된 演算 增幅器는 LM 318이고 電力增幅器에 入力되는 電壓의 最大值는 30 V 되도록 抵抗比를 調整하였다.

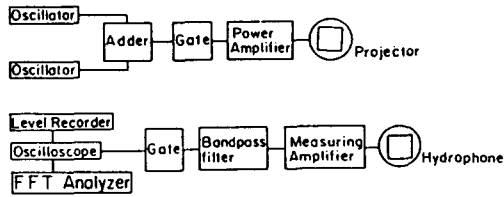


Fig. 2. Block diagram for experiments

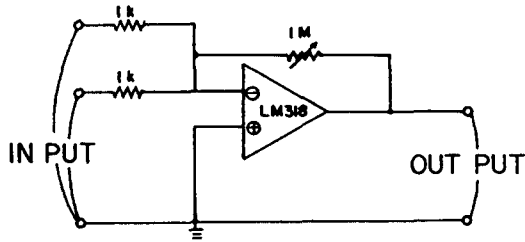


Fig. 3. Circuit diagram of adder.

또 226 dB(re/μpa) 정도의 높은 音壓을 얻기 위한 電力增幅器의 回路圖는 Fig. 4와 같다.

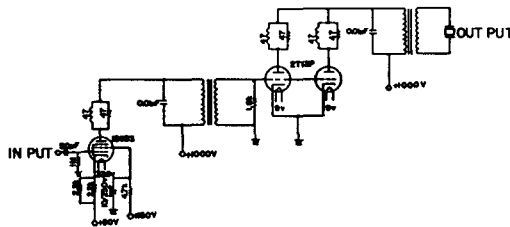


Fig. 4. Circuit diagram of power amplifier.

本 實驗에 使用된 送波器는 Barium-Titanate 振動子로 共振周波 200 KHz, 크기 110φ×35 mm 인 원판型이다. 本 實驗에 使用된 裝備의 諸元은 Table 1과 같다.

2. 實驗方法

2-1. 音源의 特性

本 實驗에 使用한 音源의 特性을 調査하기 위한 送受波의 配置는 Fig. 5와 같다. 먼저 200 KHz 單一周波數로 驅動할 때의 音源特性을 調査하기 위하여 500 L×400 W×450 H 인 콘크리트 水槽에서 送波器와 受波器를 水面으로부터 120 cm 아래에 100 cm 의 거

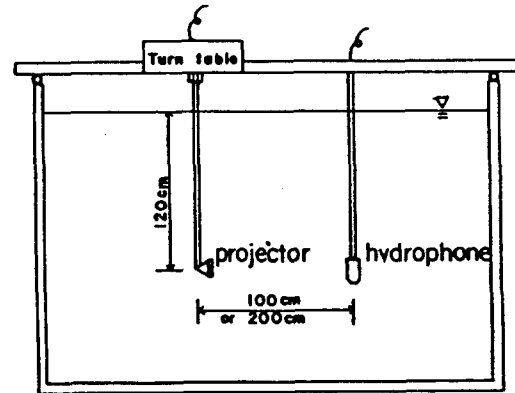


Fig. 5. Experimental set up..

Table 1. Specifications of equipments used for experiments

| Equipments | Specifications |
|---------------------------------------|--|
| Hydrophone(B & K Type 8100) | Frequency range: 0.1 Hz to 200 KHz Shielded-element construction |
| Audio generator (TRIO) | Frequency range: 20 Hz to 210 KHz |
| Gating system (B & K Type 4440) | Frequency range: DC to 200 KHz Adjustable burst length Adjustable delay between output gate and measuring gate |
| Bandpass filter (B & K Type 1617) | 41 third-octave filter bands, center frequency 2 Hz to 200 KHz 9 third-octave filter bands, center frequency 25 Hz to 160 KHz |
| Measuring amplifier (B & K Type 2607) | Frequency range: 2 Hz to 200 KHz Measuring range: 10 μV to 300 V rms, f _{sd} |
| Level recorder (B & K Type 2307) | AC(2 Hz to 200 KHz), DC recording RMS, Average, Peak detection 12 fixed paper speeds |
| FFT analyzer (ONOSOKKI CF-400) | Frequency range: 5 Hz to 20 KHz Input voltage: 0.1 to 40 V rms |
| Digital storage oscilloscope (GOULD) | Bandwidth: DC to 20 MHz Maximum input voltage: 400 V peak |

리를 두고 서로 마주보게 고정하였다. 送波器는 turn table 로 360° 回轉시키면서 펄스幅이 0.3 m sec 인 펄스波를 送波하고 이를 受波器로 受波하여 오실로스코프로, 그 波形을 觀察하면서 level recorder 로 beam pattern 을 記錄하였다.

또 parametric 音源의 特性을 調査하기 위하여는 두 音波의 干涉領域을 考慮하여 送波器와 受波器 사이의 距離를 200 cm 로 하였으며 1次波의 平均周波數는 200 KHz, 差周波數는 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz, 20 KHz 의 4 種類로 하였다. 이때 受波된 音波는 bandpass filter 를 거친 다음 오실로스코프, level recorder, FFT analyzer 에 入力시켜 分析하였다.

2-2. 標의 強度 測定

魚體의 標의 強度를 測定하기 위하여 本 實驗에서 標의으로 使用한 魚種은 송어(grey mullet, Mugil cephalus)로 그 體長은 34 cm 였다. 또 2마리, 3마리에 對하여 標의 強度를 測定할 때에는 魚體를 同一平面에 간격없이 쌓아올린 모양으로 配置하였다.

標의 強度를 測定하기 위하여 먼저 半徑이 7 cm 인 쇠구의 標의 強度가 理論式에 의하여 計算된 값과 一致하도록 level recorder 의 電壓選擇을 調整한 다음 200 KHz 의 單一周波數 音源과 parametric 音源으로 單一魚體의 各部分別 標의 強度를 測定한 後 魚體數를 2마리, 3마리로 增加시켜 이에 對한 標의 強度로 測定하였다. 이때 parametric 音源의 差周波數는 變換效率와 標의의 크기를 考慮하여 10 HHz 로 하였으며 펄스幅은 0.3 m sec 로 하였다. 또 魚體로부터 後方散亂된 信號音 外의 雜音을 없애기 위하여 受波器에는 Fig. 6과 같은 스킵로 遮蔽안테나를 附着하였으며 標의 強度를 測定하기 위한 魚體固定은 Fig. 7과 같이 하였다.

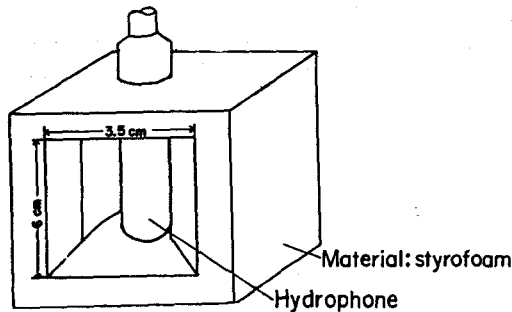


Fig. 6. Antenna for giving a directivity of hydrophone.

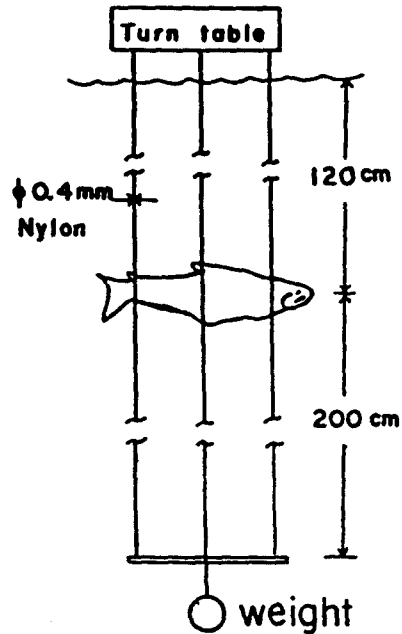


Fig. 7. Equipment used for suspending fish.

結果 및 考察

1. 音源의 特性

1-1. Beam Pattern

200 KHz 의 單一周波數로 驅動할 때 本 音源의 音壓은 226 dB(re 1 μ Pa)였으며 指向角(-3 dB)은 約 5° 였다. Fig. 8은 單一周波數 音源의 beam pattern 을 Fig. 9는 parametric 音源의 beam pattern 을 level

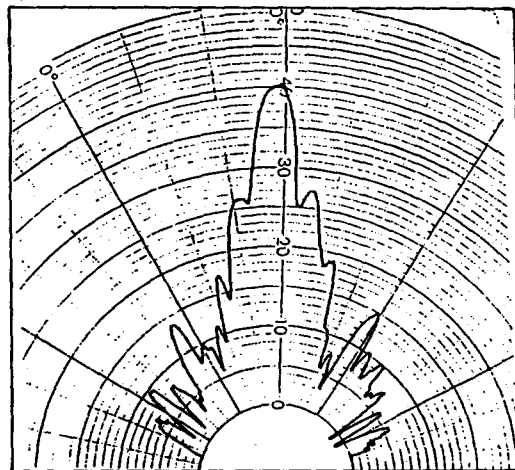


Fig. 8. Beam pattern of acoustic source excited at frequency of 200 KHz.

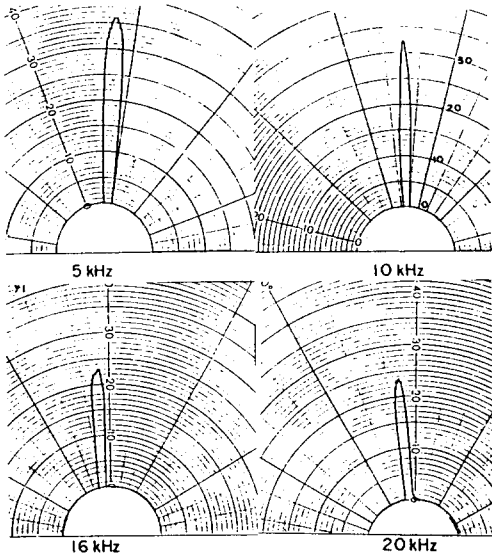


Fig. 9. Beam patterns of parametric acoustic source excited at frequencies of 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz and 20 KHz.

recorder 로 그린 것이다. 이 그림으로 알 수 있듯이 單一周波數로 驅動할 때의 beam pattern 에는 많은 副葉이 있지만 parametric 音源의 beam pattern 에는 副葉이 전혀 없는 理想의인 形態이다.

1-2. Parametric 音源의 波形 및 spectrum

Fig. 10은 parametric 音源의 波形 및 spectrum 을 FFT analyzer 로 分析한 것이다. 이 spectrum 에서 周波數 帶域幅이 약간 넓게 나타나는 것은 放射되는 音波가 펄스이고 또 波形의 前後端이 不安定하기 때문인 것으로 判斷된다. 本 parametric 音源에서는 差周波數가 높아질수록 1次波는 振動子의 共振帶域을 벗어나는 程度가 커지므로 音壓의 低下는 물론 波形도 不安定해진다. Fig. 11은 水中에 放射된 beat 와 이것이 bandpass filter 를 通過했을 때의 差周波數 波形을 오실로스코프로 觀察한 것이다.

1-3. 指向特性

Parametric 音源의 周波數 低減比(f_0/f)에 따르는

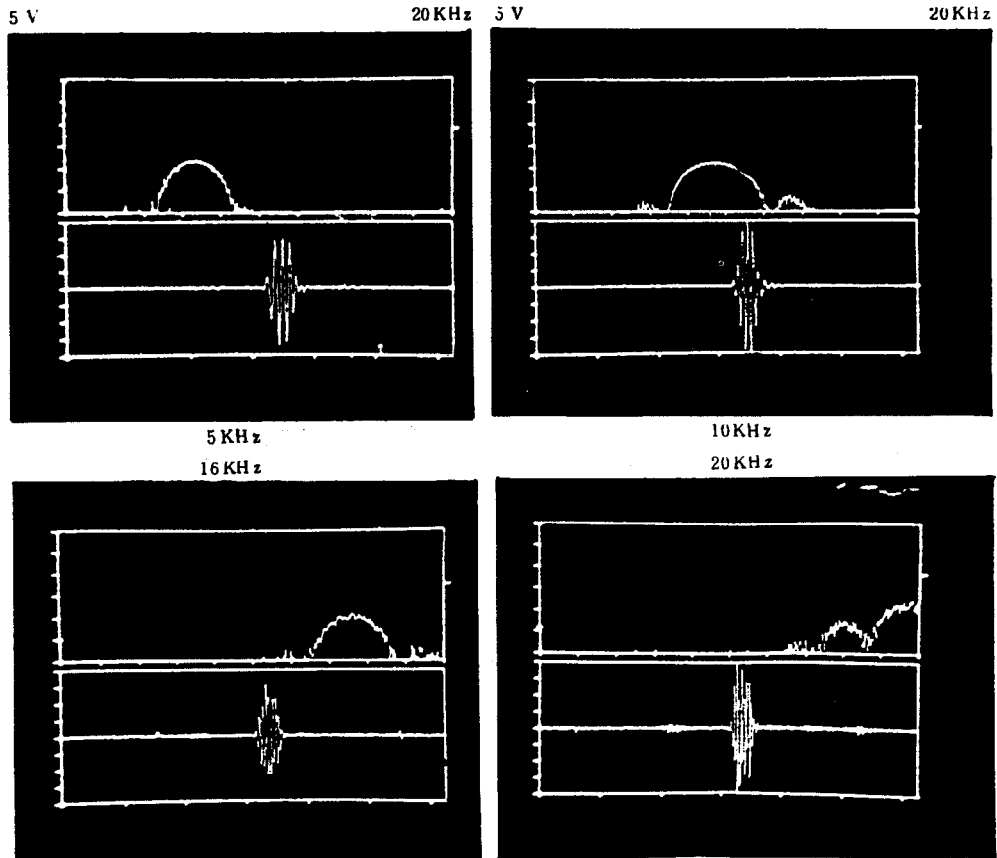


Fig. 10. Pulse shapes and Fourier spectra of sound produced by difference-frequency.

指向角의 變化는 Fig. 12와 같다.

周波數가 5 KHz 일 때의 指向角(-3 dB)은 4.3°, 10 KHz 일 때는 2.2°, 16 KHz 일 때는 3.0°, 20 KHz

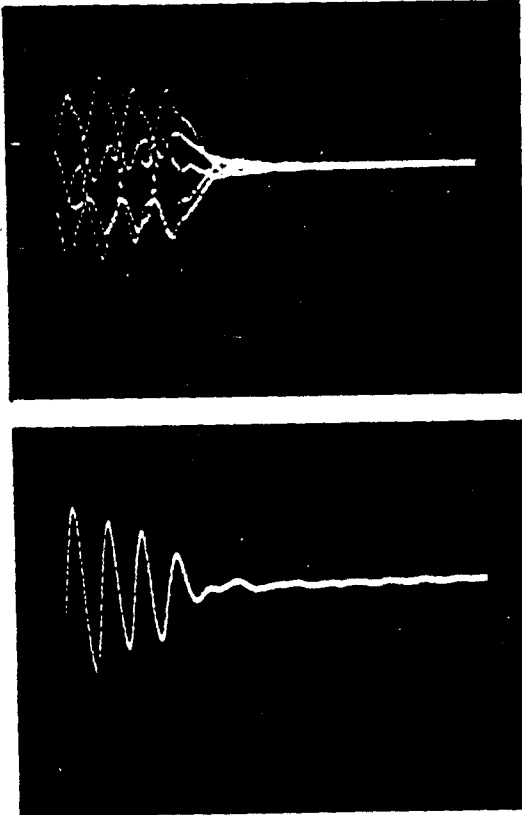


Fig. 11. Beat and wave form produced by difference frequency.

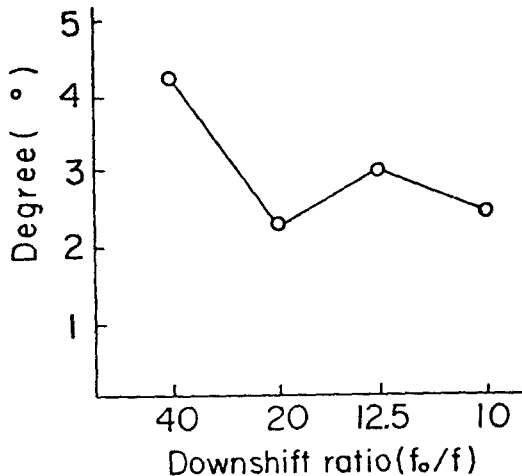


Fig. 12. Variation of beam widths in accordance with downshift ratio.

일 때는 2.5° 였으며 本實驗에서는 대체로 周波數 低減比가 減少할수록 指向角이 작아지는 傾向을 나타내었다.

1-4. 音波變換效率

Parametric 音源의 周波數 低減比(f_0/f)에 따르는 變換效率의 變化는 Fig. 13과 같다. 周波數가 5 KHz 일 때의 變換效率은 0.9%(Parametric 利得은 -41 dB)였으며, 10 KHz 일 때는 0.55%(Parametric 利得은 -4.4 dB), 16 KHz 일 때는 0.1%(Parametric 利得은 -60 dB), 20 KHz 일 때는 0.04%(Parametric 利得은 -68 dB)였다. 이와 같이 本實驗에서는 周波數 低減比가 減少할수록 1次波는 振動子의 共振帶域을 벗어나는 程度가 커지므로 變換效率이 급격하게 낮아졌다.

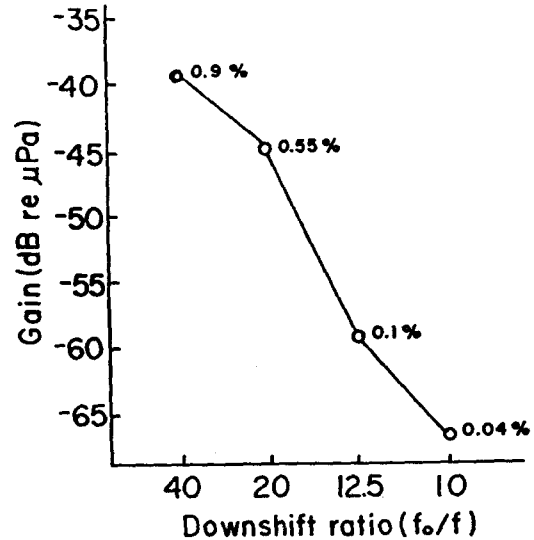


Fig. 13. Variation of parametric gains in accordance with downshift ratio.

2. 標的強度

200 KHz의 單一周波數로 驅動할 때 level recorder 로 記錄한 魚體의 各部分別 反射 pattern은 Fig. 14와 같다. 이때 標的으로 使用한 魚體의 體長과 波長과의 比(L/λ)는 48.7이었으며 水中音速은 Greenspan의 式에 의하여 計算하였다.

單一魚體에 對하여 測定한 標的 強度는 最大値에서 5° 範圍의 값을 平均했을 때 側面이 -36.5 dB, 머리부분이 -48 dB, 꼬리부분이 -51.5 dB로 이미 報告된 研究結果와 잘 一致한다.

또 魚體數의 增加에 따른 標的 強度의 變化는 Fig. 15

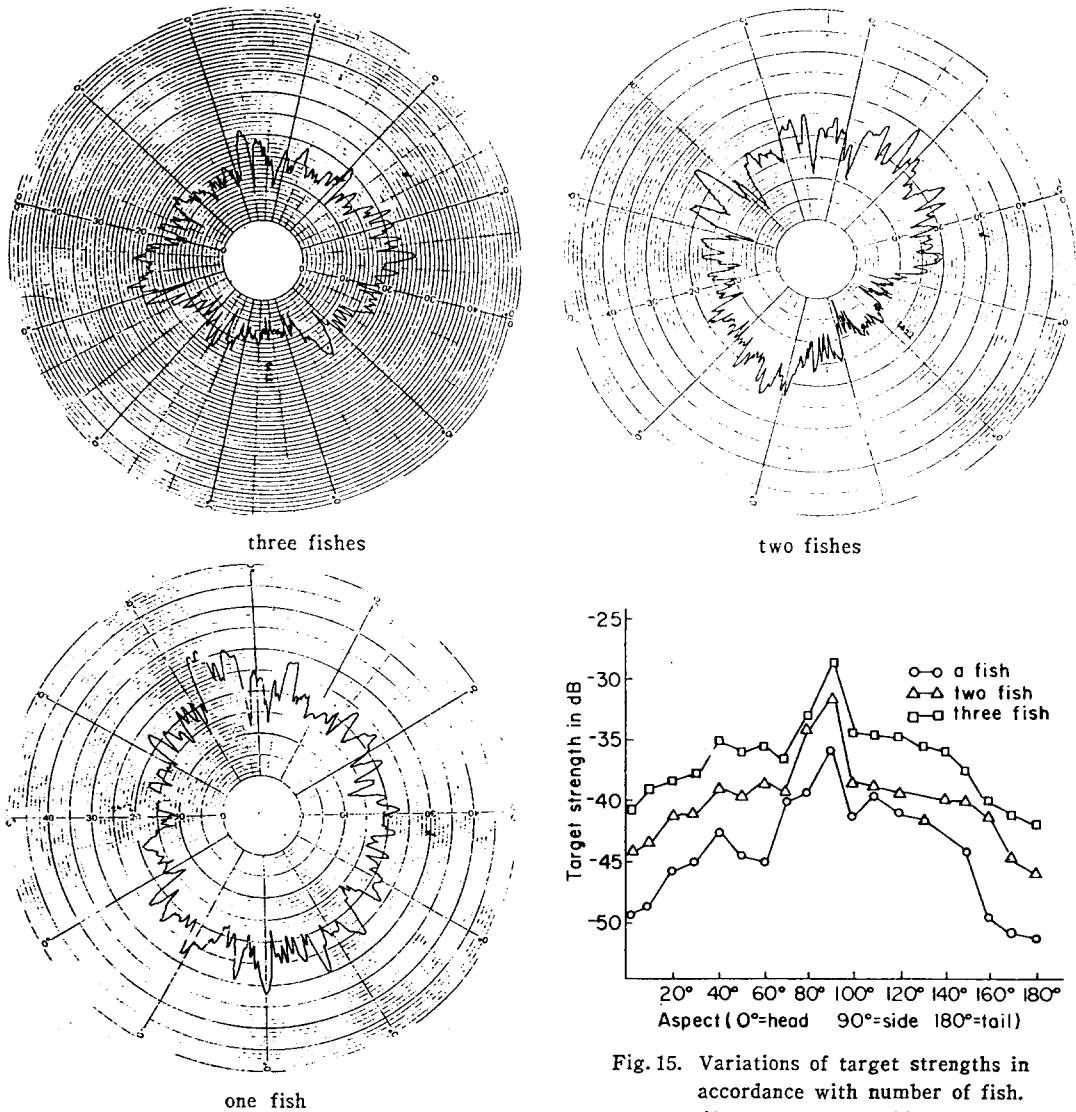


Fig. 14. Polar plots of fish directivity in the yaw (coronal) plane for 34 cm grey mullet. Arrow denotes -29 dB target strength. (frequency: 200 KHz)

Fig. 15. Variations of target strengths in accordance with number of fish. (frequency: 200 KHz)

와 같다. 이 그림에서와 같이 2마리일 때의 標的強度는 單一魚體의 標的強度에 비하여 側面이 5.5 dB, 머리부분이 5 dB, 꼬리부분이 5.5 dB, 增加하였고 3 마리일 때의 標的強度는 側面이 8.5 dB 머리부분이 8 dB, 꼬리부분이 9 dB 增加하였다. 이 結果는 $TS_n = TS_1 + 20 \log n$ 의 理論式¹⁰⁾과 比較의 一致한다. 여기서 TS_n 은 n 마리의 標的強度이고 TS_1 은 한마리의 標的強度이다.

한편 parametric 音源을 利用했을 때 魚體의 各部

別 反射 pattern은 Fig. 16과 같고 이때 標的으로 使用된 고기의 體長과 波長과의 比(L/λ)는 2.5였다. 이 音源으로 測定한 單一魚體의 標的強度는 最大值에서 5° 範圍의 값을 平均했을 때 側面이 -37 dB, 머리부분이 -53 dB, 꼬리부분이 -56.5 dB로 單一 周波數로 驅動할 때의 結果에 비하여 머리부분과 꼬리부분에서 5 dB씩 偏差를 보이고 있다. 이는 beam pattern과 周波數의 差異때문에 생기는 結果로 判斷되며 보다 詳細한 原因의 糾明이 要求된다.

Fig. 17은 parametric 音源을 利用했을 때 魚體數의 增加에 따른 標的強度의 變化를 나타낸 것인데, 2마리일 때의 標的強度는 單一魚體의 標的強度에

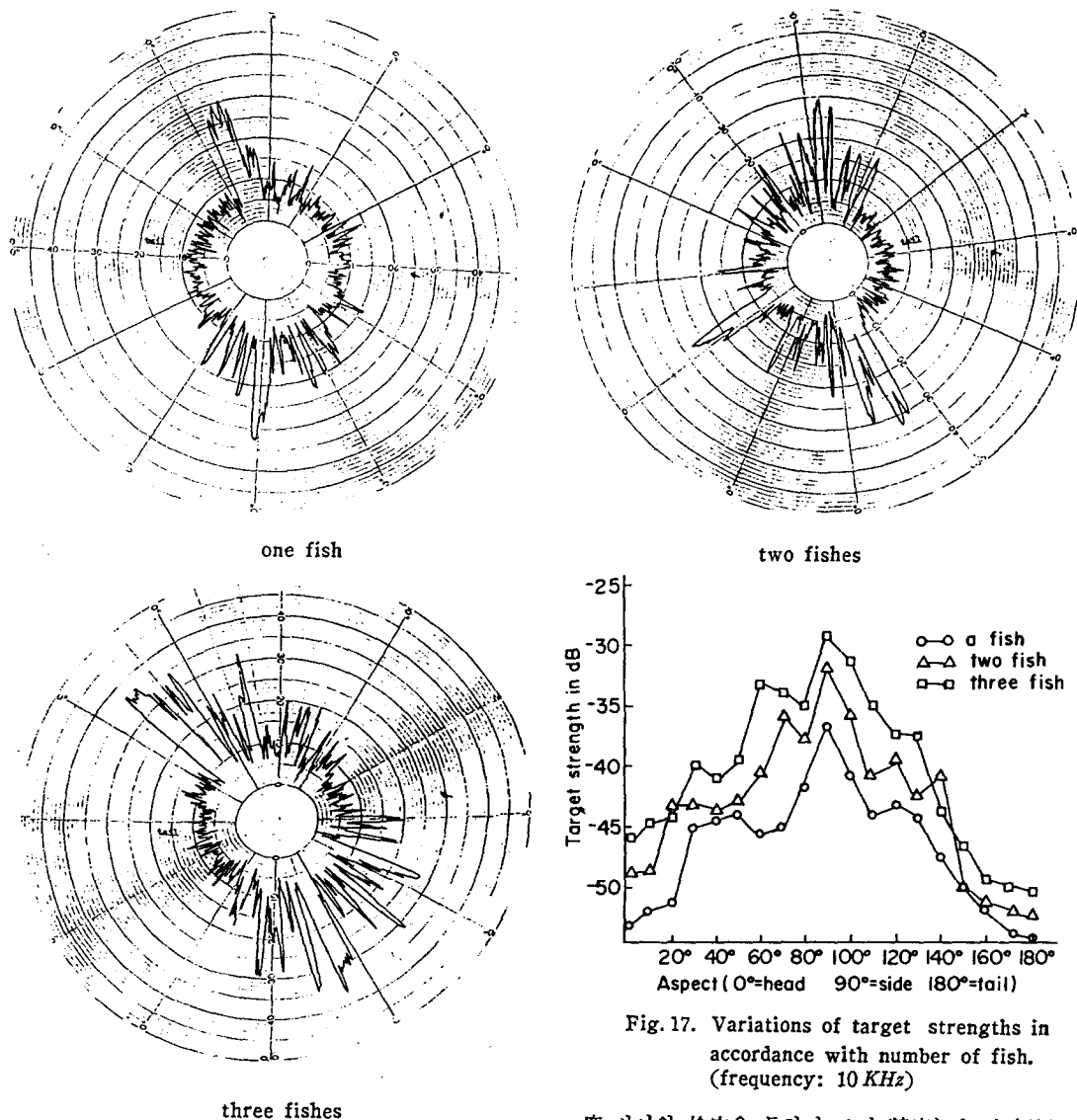


Fig. 16. Polar plots of fish directivity in the yaw (coronal) plane for 34 cm grey mullet. Arrow denotes -29 dB target strength. (frequency: 10 KHz)

비하여 側面이 5 dB, 머리부분이 5 dB, 꼬리부분이 4 dB 增加하였고 3마리일 때의 標的 強度는 側面이 8.5 dB, 머리부분이 8 dB, 꼬리부분이 6 dB 增加하였다. 이 結果는 單一周波數로 驅動할 때의 結果에 비하여 머리부분과 꼬리부분에서 1~3 dB 差異를 보이고 있다. 그러나 Fig. 16에서 보는 바와 같이 魚體의 數가 增加하여도 側面, 머리, 꼬리부분의 區分이 明確하므로 이 音源을 利用할 때의 魚體數와 標的 強

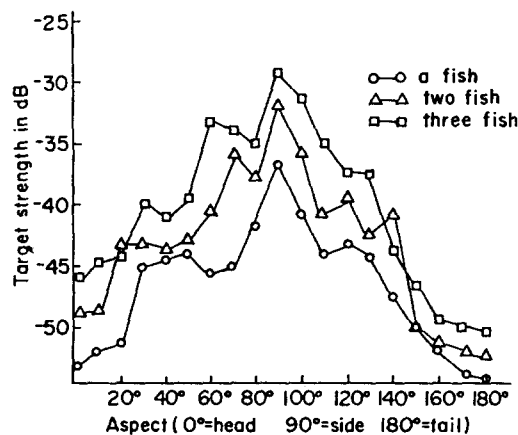


Fig. 17. Variations of target strengths in accordance with number of fish. (frequency: 10 KHz)

度 사이의 檢定을 통하여 보다 精度높은 水中資源量 推定이 可能한 것으로 判斷되며, 또한 本 音源은 副葉이었고 指向性이 銳利하므로 近距離에서 魚體의 크기 推定에도 그 精密性을 提高할 可能性이 큰 것으로 생각된다.

要 約

parametric 音源을 魚探에 應用하기 위한 基礎研究로서 本 實驗에서는 parametric 音源의 特性을 調査하고 이 音源으로 魚體에 對한 標的 強度를 測定하여 그 結果를 200 KHz의 單一周波數 音源으로 測定한 結果와 比較·檢討하였다. 그 結果를 要約하면

다음과 같다.

1. 200 KHz 인 單一周波數로 驅動할 때의 指向角은 5.0°였고, parametric 音源의 周波數가 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz, 20 KHz 일 때의 指向角은 各各 4.3°, 2.2°, 3.0°, 2.5°로서 周波數 저감비가 減少할수록 指向角이 예리하였으며 副葉은 전혀 나타나지 않았다.

2. parametric 音源의 周波數가 5 KHz, 10 KHz, 16 KHz, 20 KHz 일 때의 音波變換效率은 各各 0.9% (parametric 利得은 -41 dB), 0.55% (parametric 利得은 -45 dB), 0.1% (parametric 利得은 -60 dB), 0.04% (parametric 利得은 -68 dB)로 周波數 저감비가 減少할수록 音波變換效率은 급격히 낮아졌다.

3. parametric 音源으로 測定한 魚體의 標的強度는 200 KHz 의 單一周波數 音源으로 測定한 標的強度에 비하여 單一魚體일 때는 머리부분과 꼬리부분에서 5 dB 씩 낮았으며 魚體數가 2~3마리일 때는 머리부분과 꼬리부분에서 1~3 dB 程度 낮았으나 側面部分은 비슷하였다.

文 獻

1. 竹内俱佳(1979) : 파라메트릭 소나. 日本音響學會誌 35(10), 578-586.
2. Westervelt, P.J.(1963) : Parametric acoustic array. JASA, 35, 535-537.
3. Bellin, J.L.S. and R.T. Beyer(1962) : Experimental investigation of an end-fire array. JASA, 34, 1051-1054.
4. Moffett, M.B. and R.H. Mellen(1977) : Model for parametric acoustic source. JASA, 61(2), 325-337.
5. 竹内俱佳(1982) : 파라메트릭 아레에 關한 實用例, 日本音響學會誌 38(4), 217-225.
6. 中村敏明·中村昭(1984) : 파ルス·파라메트릭 音源을 이용한 壁面의 反射率의 測定. 日本音響學會講演論文集 721-722.
7. Berklay, H.O. and D.J. Leahy(1974) : Farfield performance of parametric transmitters. JASA 55(3), 539-546.
8. 奥島基良(1984) : 海洋音響, 84-88.
9. 金成阜·田炳斗·張志元(1984) : 多重魚體에 對한 標的 散亂強度 測定. 韓國音響學會誌 3(2), 59-63.
10. 青山恒雄(1982) : 네크톤および 마이크로네크톤의 크리티컬 아세스먼트 技法開發에 關한 基礎研究. 東京大學海洋研究所.