

수중음향이용의 신기술

황두진/여수대학교 해양생산학과

1. 서 언

수중음향기술은 매우 빠른 속도로 진보하고 있다. 이것은 음향기술이 전자기술이나 컴퓨터 기술의 급속한 발전과도 밀접한 관계를 가지며, 일반적인 기술에서 정교하고도 강력한 기술로 승화되었기 때문이다. 예를 들면, 자연스럽게 유명하고 있는 어류의 음파산란강도(타게트 스트렌스, TS)의 값을 간단하고도 정확히 측정할 수 있는 스프리트빔 계량어군탐지기, 평면적인 측심을 가능하게 하는 크로스팬빔방식의 측심기, 항주하면서 유속 프로파일을 그려갈 수 있는 도플러 프로파일러, 태평양과 같은 거대한 해역의 수온 분포를 모니터 할 수 있는 음향도 모그래피기술 등, 얼마전까지만 하여도 상상조차 할 수 없었던 일 들이 가능하게 되었다.

수중음향기술의 발전 원인은 바다의 중요성을 재확인한 것에서 비롯된 것이다. 지구표면의 7할을 점하고, 천문학적인 숫자의 능력을 가지고 있는 바다는 지구 환경의 결정요인으로서, 또 막대한 자원의 보고로서 재확인되고 있다. 해양생물에 대해서는 위대한 자연재생산의 체계(=생태계)로서의 인식이 정착되어 가고 있다. 바다에 대한 지식의 개척은 그 관측수단을 필수로 하고 있으며, 그중 가장 강력한 관측수단은 바로 음향이다. 동서의 냉전해소에 의한 수중음향기술의 수요의 변화는 해양이나 생물

의 관측수단으로서의 음향기술을 한층 더 발전시킬 수 있을 것이다.

현재에는 '수산음향(fisheries acoustic)' 이라는 말이 극히 보편적으로 사용될 정도로 발전해 있다. 수산음향이란 단어는 과거에는 없었던 말이다. ICES 등이 주최하는 대규모적인 수산음향심포지움이 5년에 1번꼴로 개최되고 있다. 1995년에는 영국의 Aberdeen에서 개최되었으며, 이 심포지움의 타이틀은 '수산과 플랑크톤음향(Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics)' 이었다. 여기서 '플랑크톤음향'이라는 말은 최근 해외의 문헌 등에서 자주 눈에 띄는 용어이다. 수산음향이라는 말을 좁게 해석하면, 어업이 대상으로하는 수산생물, 즉 어류를 대상으로 음향을 이용하여 관측하는 기술이라고 풀이 할 수 있으며, 플랑크톤음향과는 상대적인 말이다. 또 넓게 해석하면 모든 해양생물을 대상으로 음향을 이용하여 관측하는 기술을 말하며, 여기에 플랑크톤음향도 포함된다.

지금부터 넓은 의미로서의 수산음향에 대하여 그 기술의 발전을 간단하게 정리하여 보고자 한다. 어군탐지기, 소나 등의 탐어기술(제1세대)이 고도로 발달하여, 어업기술을 비약적으로 고도화하였다. 계량어군탐지기 등의 자원조사용의 기술(제2세대)도 급진전하여, 수산자원조사분야에서 부동의 위치를 구축하였다. 현재는 생태계나 해양환경의 정량적관측수단(제3세대)

으로 발전하고 있다. 각각의 세대는 앞세대의 기술적 성과를 연속적으로 발전시키는 형태로 진행되어 왔다. 플랑크톤의 음향기술은 제3세대의 수산음향기술로서, 계량어군탐지기술을 계승하여 꽃피우게 되었다.

이 글에서는 이 플랑크톤음향기술을 중심으로 한 새로운 수중음향기술을 소개하고자 한다. 플랑크톤의 음향계측은 GLOBEC(GLOBal ocean ECosystems dynamics) 프로젝트의 일부분으로 그 비중이 매우 높다. 따라서, 이 프로젝트의 활동에 대해서도 조금 소개하고자 한다.

‘플랑크톤음향’이라는 단어가 만들어지게 된 것은 플랑크톤을 대상으로하는 경우, 앞에서 말한 좁은 의미에서의 수산음향기술과는 많은 차이점을 가지고 있기 때문이었다. 가장 큰 차이는 그 대상생물의 크기이지만, 실제로 그 크기의 차이에서 오는 음파의 산란특성의 차이가 큰 의미를 가지고 있다. 바꾸어 말하면, 어류의 경우는 크기(길이)와 부레의 유무에 의해서 대체적으로 산란강도가 결정되지만, 플랑크톤의 경우는 그 외 또 하나의 요소, 즉 주파수에 의한 산란특성이 복잡하다는 것이다. 또한, 플랑크톤 음향에서는 플랑크톤 등의 소형 생물의 음향산란 특성을 우선 알아두어야 할 필요가 있는데, 이것에 대해서는 차후 논하고자 한다.

어류의 음향계측은 보통 항주하는 선박에서 계측하게 된다. 플랑크톤의 경우도 계측대상이 단일종으로 넓은 범위에 분포하고 있을 때, 이 방법으로 계측이 가능하지만, 실제로는 항주하면서 계측하는 것은 불가능하다. 따라서 플랑크톤을 대상으로한 음향계측을 위하여 구체적으로 접근해 보면, 먼저 계측기의 설치방법으로는 수하식과 계류식이 있으며, 또 대상생물이 수십 마이크로미터에서 센티미터의 단위로 그 크기의 폭이 매우 넓으므로 대상생물에 따른 계측기의 선택도 고려해야 한다. 3절에서는 여러 가지 계측시스템이나 방법에 대하여 소개하고, GLOBEC의 워킹그룹의 보고서에서 추천하고 있는 음향계측기술을 소개한다. 4절에서는 결론으로서 연구체제에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 해양생물의 음파산란

1) 해양생물의 음파산란 모델

해양생물의 산란특성은 측정, 실험모델, 이론모델 등에 의해서 연구되고 있다. 특히, 측정이 어려운 소형 생물을 대상으로한 산란특성은 이론모델을 많이 활용하는 것이 편리하다. 현재 사용하고 있는 산란모델로서는, 기포공진모델(Love의 부레^(1,2)등), 액상구체모델(Anderson의 엄밀해⁽³⁾, Johnson의 하이패스모델⁽⁴⁾), 회전타원체모델(Furusawa의 중공회전타원체, 액상회전타원체모델^(5,6)), 절단원통모델(Stan-ton⁽⁷⁾) 등을 들 수 있다.

그림 1은 해양생물의 광대역 산란특성을 나타낸 것이다⁽²⁾. 이 모델은 Furusawa가 개발한 회전타원체 이론모델과 Love의 부레공진모델에다 약간의 실측치에 의한 보정을 행하여 얻은 결과이다. 횡축은 체장 L 을 수중음파의 파장 λ 로서 기준화한 값이고, 종축은 타겟 스트렌스(TS)를 센티미터 단위의 체장을 제곱하여 기준화한 값(TScm)이다. 음파의 파장은 수중음속 $c = 1500\text{m/s}$ 를 주파수 f 로 나누면 얻어진다. 예를 들어 파장은 15kHz에서 10cm, 150kHz에서 1cm, 1500kHz에서 1mm이므로, 횡축에 길이를 대입하면 주파수에 대하여, 주파수를 대입하면 길이에 대한 변화를 알 수 있다.

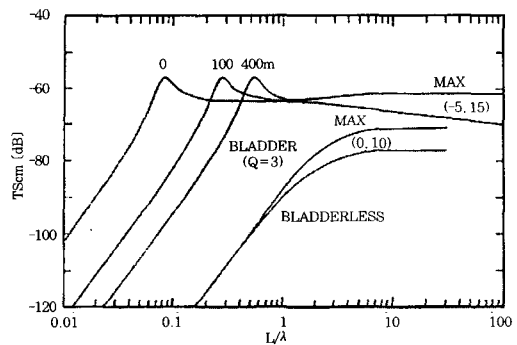


그림 1. 해양생물의 광대역 음파산란특성
체장/파장(L/λ)에 대한 기준화 타겟 스트렌스 특성

그림에서 나타난 바와 같이, 부레(공기주머니)를 가진 생물과 가지고 있지 않은 생물에서는 그 특성이 크게 달라진다. 부레를 가진 경우 그 공진 주파수가 수심과 함께 크게 변하므로 공진의 피크가 이동한다. 통상의 어류의 대부분은 부레를 가지고, 멸치치어, 관해파리, 나멸치 등의 소형생물도 많은 부레를 가지고 있다. 부레의 공진 주파수 부근에서는 매우 큰 에코가 되돌아 온다^[2].

L/λ 가 크면, 부레를 가진 어종(유표어), 부레가 없는 어종(무표어) 모두가 어류의 자세에 따라 TS가 변동한다. 그림 중에 MAX는 등방향최대 TS이고, 그리고 (-5, 15) 등으로 표시한 것은, 어류의 자세가 머리를 5° 아래로 숙인 상태에서 어탐의 진동자의 수직선으로부터 좌우 15° 표준편차가 있음을 의미한다. L/λ 가 크면, TS는 주파수에 대해서는 큰 변화가 없고, 통상의 무표어는 데시벨 표현으로

$$TS = TS_{cm} + 20 \log L \quad (1)$$

와 같이 비교적 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서 cm 단위의 체장 L을 알면 TS를 알 수 있으며, 유표어의 경우 대략 -60~-70dB 정도이다 ($TS_{cm} = 10 \log TS_{cm}$).

부레의 유무에 관계없이 L/λ 가 작은 것은

$$TS_{cm} \propto (L/\lambda)^4 \quad (2)$$

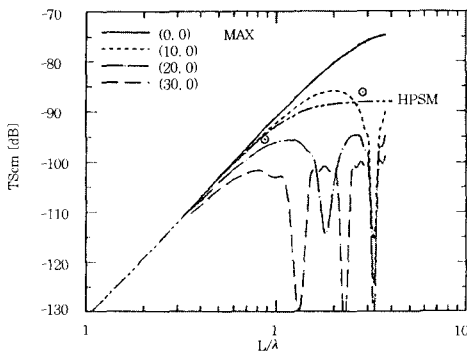


그림 2. 크릴새우의 음파 산란특성 회전타원체 모델, 액상구체모델(HPSM), 실측결과

을 이용하여 계산하며, 통상 이 영역은 Rayleigh 영역($L/\lambda < 1$)이라고 부르며, 이 영역에서는 부레의 유무에 의해 TS의 차이가 크게 난다.

플랑크톤의 계측에서도 가장 중요한 무표어의 산란 특성에 대하여 좀 더 상세하게 살펴보자. 플랑크톤은 주위의 물에 비해 밀도와 음속이 다른 액체의 편향회전타원체모델을 이용하여 설명할 수 있다^[5]. 기준화TS는 다음 식과 같이 회전타원체 파동함수를 포함하는 복잡한 함수로 나타내어 진다.

$$TS_{cm} \equiv TS/L [cm]^2 = TS_{cm}(L/\lambda, \theta, b/a, \rho_r, c_r) \quad (3)$$

여기에서 θ 는 후방산란의 방향(등방향에서 90°), a 는 장반경, b 는 단반경(b/a 는 크릴새우에 대해서는 0.117), ρ_r 은 생물체와 주변 매질의 밀도비(1.0357), c_r 은 생물체와 주변 매질의 음속비이다(1.0279).

플랑크톤의 TS는 간단하게 아래의 식 Anderson의 액상구체모델^[3]을 모체로 한, Johnson의 하이패스모델^[4]로 추정하는 경우가 많다.

$$TS = a_e^2 \frac{2(ka_e)^4}{2 + 3(ka_e)^4} d^2 \quad (4)$$

$$d = \frac{1 - \rho_r c_r^2}{3\rho_r c_r^2} + \frac{1 - \rho_r}{1 + 2\rho_r} \quad (5)$$

여기에서, a_e 는 생물체의 체적과 동등한 구의 반경, $k (= 2\pi/\lambda = 2\pi f/c)$ 는 파수이다.

그림 2는 회전타원체모델과 하이패스모델(HPSM)으로 크릴새우의 산란특성을 계산한 결과를 나타낸 것이다^[6]. 밀도비 등의 파라미터는 그림의 가로로 표시한 값을 이용하고, 그때의 생물체 자세는 일정한 것으로 가정하였다. 이들 모델에 의한 결과와 Foote 등에 의한 실측치^[8](\odot 마크)도 그림에 나타내었다. 하이패스 모델과 회전타원체 모델과는 L/λ 이 0.5 이하에

서 잘 일치하였고, 1 정도까지는 비교적 잘 일치하였다. 그것보다 큰 경우는, 자세에 의한 TScm의 변동이 크게 나타났다. 구체모델에서는 산란 지향성이 없기 때문에, L/λ 이 크면 TS는 추정할 수 없게 된다. Foote 등에 의한 실측치는 자세가 (10, 0)의 회전타원체 모델과 대체로 일치하고 있지만, 자세가 다르면 TScm가 크게 바뀌게 된다. 그러나, 자세에 대해서는 평균 TS와 비교하면 잘 일치하는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

2) 주파수의 선택

위의 산란 특성으로부터 L/λ 또는 ka_e 가 작으면, (2), (4)식에 의해서 TS가 급격하게 작아짐과 동시에 체장의존성이 증가하고, 양자 모두 큰 계측 오차의 원인이 된다. 한편, L/λ 가 크면, 그곳에서는 높은 주파수를 사용하게 됨으로서, 음파감쇠가 급증하여 신호가 약하게 되거나, 또 크릴새우와 같이 몸이 긴 대상체는 산란 강도의 자세 의존성이 크게 증가하고, 이 양자 모두 큰 계측 오차를 수반하게 된다. 그러므로, 부레가 없는 생물의 경우, $L/\lambda = 1$ 은 주파수를

결정하기 위한 하나의 기준점이 되기도 한다. L/λ 이 1 이하이면, TS가 급격하게 적어져 측정이 불가능하게 된다는 점에서, 여기에서는 $L/\lambda = 1$ 에서 결정하는 주파수를 한계주파수라고 부른다.

그림 3은 횡축에 생물체의 크기를 표시하여 각종 플랑크톤을 나타낸 것으로⁹⁾, 한계주파수도 표시하였다. 이 그림으로부터 관측 대상체와 그것에 필요한 대략의 주파수를 알 수 있다.

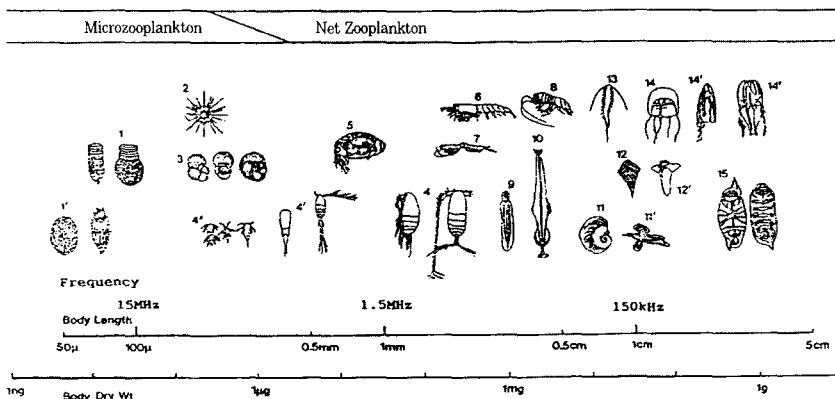
3. 음향에 의한 플랑크톤 계측기술

1) 계측방법

예전부터 플랑크톤이나 소형 생물의 음향계측에는 여러 가지 방법을 사용해 왔다. 여기에서는 그중에서도 실제 사용할 수 있는 방법에 대해서 설명한다. 이 분야에서는 Greenlaw가 잘 정리하고 있으므로¹⁰⁾, 그것을 참고하였다.

가) 1 주파방식(계량어탐방식)

간단하게는 어류의 자원량 추정에 사용하고



- 1 : 원생동물, 유각섬모충류, 1' : 무각섬모충류, 2 : 원생생물, 방산충류, 3 : 유공충류, 4 : 대형요각류, 4' : 소형요각류, 4'' : 요각류, 5 : 대형충류, 6 : 크릴 새우류, 7 : 보리 새우류, 8 : 단각류, 9 : 미충류, 10 : 모약류, 11, 11' : 이족류, 12 : 유각익조류, 12' : 무각익족류, 13 : 다모류, 14 : 물해파리류, 14' : 관해파리류, 14'' : 절해파리류, 15 : 이색류

그림 3. 균형적인 플랑크톤과 한계주파수(池田)

있는 계량어군탐지기의 방식, 즉 적분방식^[11]을 적용할 수 있다. 계량어군탐지기에서 사용하고 있는 기본적인 관계식은

$$S\nu(f_1) = nTs \quad (6)$$

이다. 즉, 체적산란강도 SV(변수는 Sv)를 측정하여 TS 값을 주면, 분포밀도 n을 알 수 있다. 결국, 크기를 미리 알고 있으면 대상어종이 단일어종이라면 앞에서 나열한 모델 등에 의해 TS를 알 수 있으므로 이 방법을 사용하게 된다.

나) 2 주파방식

SV의 측정을 2 주파로 행하면 (6)식과 같은 방법으로

$$\begin{aligned} S\nu(f_1) &= nTs(Lf_1) \\ S\nu(f_2) &= nTs(Lf_2) \end{aligned} \quad (7)$$

이 얻어진다. 이 두 식의 비를 구하면, 분포밀도 n은 같으므로

$$\begin{aligned} S\nu_r &\equiv S\nu(f_1)/S\nu(f_2) \\ &= Ts(L, f_1)/Ts(L, f_2) \end{aligned} \quad (8)$$

이 되어, 좌변은 측정에 의해 얻어지고, f_1, f_2 는 이미 알고 있으므로 (3), (4)식과 같이 Ts가 f와 체장(L 또는 a_e)함수로서 주어지면, 체장을 알 수 있다. L을 알게 되면, 다시 (7)식을 이용하여 n도 알 수 있다. 이 방법을 이용하면 크기까지도 측정할 수 있지만, 크기까지 포함한 대상생물이 단일종일 필요가 있다.

(8)식에 (4)식의 하이패스모델을 대입하면

$$a_e^4 = \frac{2}{3} \left(\frac{c}{2\pi} \right)^4 \frac{(f_1/f_2)^4 - S\nu_r}{f_1^4 (S\nu_r - 1)} \quad (9)$$

이 얻어지고, a_e 를 알 수 있다. 여기에서 주의해야 할 것은 두 주파수가 Rayleigh 영역에 있으면, 이 식은 해를 가질 수 없게 된다. 이러한 의

미에서도 $L/\lambda = 1$ 은 한계주파수임을 의미한다.

다) 다주파방식

위의 2 주파 방식은 다주파방식의 가장 간단한 예이다. 2주파 방식에서는 크기까지를 포함하여 대상이 단일이라는 조건이 붙었지만, 이러한 조건은 플랑크톤을 대상으로 하는 경우는 힘들다. 여기에서, 산란 주파수 특성을 이용하여 플랑크톤 크기별로 밀도추정하는 인버스법이 Holliday^[12], Johnson^[13], Greenlaw^[10]에 의해 제안되어 실용화 단계까지 와 있다. 아래에서 이 다주파방식이라 불리는 방법의 원리를 설명한다.

다수의 주파수 f_1, f_2, \dots 으로부터, 산란체의 체적산란강도 $S\nu(f_1), S\nu(f_2), \dots$ 을 측정한다. 크기 L에 따른 분포밀도를 $n(L_1), n(L_2), \dots$ 라고 하면, TS는 크기와 주파수에 의해 다르므로 $Ts(L_1, f_1)$ 등으로 나타낼 수 있다. SV에는 생물전체의 크기가 포함되어 있으므로, 아래의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S\nu(f_1) \\ S\nu(f_2) \\ \dots \dots \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Ts(L_1, f_1) Ts(L_2, f_1) \dots \dots \\ Ts(L_1, f_2) Ts(L_2, f_2) \dots \dots \\ \dots \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(L_1) \\ n(L_2) \end{bmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

이 식을

$$S = \sum_{bs} N \quad (11)$$

과 매트릭스로 나타내었다. S는 실측이고, \sum_{bs} 는 산란모델에 의해 미리 예측할 수 있기 때문에 크기별 밀도 N을 알 수 있다. 이것을 간단하게 푸는 방법에는 최소자승법, 즉

$$(S - \sum_{bs} N)^2 = \text{minimum} \quad (12)$$

를 이용하면 좋다. 이 결과는

$$N = (\sum_{bs}^T \cdot \sum_{bs})^{-1} \sum_{bs}^T \cdot S \quad (13)$$

이 된다⁽¹²⁾. 여기에서 T 는 전치, $^{-1}$ 은 역행렬을 나타낸다. 그러나, 실제로는 산란모델과 실측과는 일치하지 않는다. 그 이유는 측정시에 잡음 등의 측정오차가 포함되므로, 이 방법으로는 양호한 해를 구하지 못하는 경우가 많다. 예를들면 N 요소가 부(-)가 되는 경우도 있다. 최근에는 steepest descent법⁽¹³⁾이나 nonnegative least squares(NNLS)법⁽¹⁴⁾을 적용하여 추정정도를 높이기도 한다⁽¹⁰⁾.

지금까지의 설명으로 알 수 있는 바와 같이 다주파방식에서는 사용하는 산란모델이 정확할 것, 주파수의 산란특성이 잘 나타날 수 있는 곳을 선택할 것, 잡음 등의 영향이 적을 것 등을 고려하여 측정하여야 한다. 그림 1에서 설명하자면, 유포어의 공진 부근과 무포어 특성 중 급격히 증가하다 일정해지는 변곡점 부근이 적당할 것이다. 전자를 이용하는 경우, 성어의 추정도 가능하지만, 저주파의 다주파음원이 필요하게 되어 부레가 수심 등에 의해서 변화되기 쉽기 때문에 시험해 볼 필요성은 있지만, 현재로서는 실용성이 없다. 따라서, 이 방법은 공기주머니를 가지고 있지 않은 플랑크톤의 추정에 대하여 유효하다.

이 측정법은 평균의 SV만을 측정하면 되기 때문에, 측정원리는 통상의 적분방식어량추정법⁽¹¹⁾과 같다. 단, 다주파 즉 다채널의 주파수가 필요하며, 일반적으로 고주파를 이용하며, 근거리에서 측정하지 않으면 안된다. 그러므로, 수하형 또는 예항형의 송수파기를 이용하여 측정할 수밖에 없다.

라) 복수빔 방식

앞에서 설명한 3가지 방식은 에코적분방식 또는 SV를 측정하는 것을 기본으로 하고 있다. 그것에 반하여 개체추정방식이라고 불리는 방식(생물의 단체로부터의 TS를 측정하는 방식)에는 듀얼빔법이나 스프리트빔법이 현재 널리 사용되고 있다⁽¹¹⁾. 이 방식에는 개체 에코가 분

리되어야 하는 것을 전제로 하고 있으며, 일반적인 플랑크톤의 경우에 있어서는 어렵다. 그러나 뒤에서 다시 설명하겠지만, 현재 많은 듀얼빔시스템이 플랑크톤 측정에 이용되고 있다. 여기서 듀얼빔시스템이 널리 이용되는 이유를 3가지 들어보자. (1) 통상의 복수 빔시스템에도 에코 적분방식이 적용되기 때문에, 앞에서 말한 1주파방식이나 2주파방식을 적용할 수 있다. (2) 크릴새우 등의 큰 플랑크톤이나 치자어는 분포형태에 따라 단체 에코분리가 가능하며, 이들의 TS측정이 가능하다. (3) TS처리를 통하여 대상식별이 가능하다. 이 복수빔 방식에 대해서는 여러 가지 해설들이 있기 때문에⁽¹¹⁾ 여기에서는 설명을 줄이겠다.

2) 기타 계측시스템

가) Green 등의 ROV시스템

Green 등은 듀얼빔 시스템을 ROV 등에 탑재하여, 크릴새우 등의 음향산란층을 대상으로 관측하였다⁽¹⁵⁾. 그림 4는 실제 해상에서 사용하고 있는 ROV시스템은 앞의 두 방향에서 본 그림이다. 420kHz의 듀얼빔 시스템 이외에도, 수중TV, 형광광도계 등을 탑재하여 종합적인 관측을 할 수 있도록 되어 있다. 이 ROV를 하강, 상승시키면서 SV와 TS의 프로파일을 얻게 된다.

나) Holliday 등의 MAPS^(16, 17)

다음으로 Holliday 등이 플랑크톤의 추정에 이용한 다주파 시스템 MAPS(Multifrequency Acoustic Profiling System)를 소개한다. 그림 5는 그 센서부분이며, 주파수는 100kHz부터 10MHz까지의 21가지 음파를 사용하고 있다. 초음파 송수파기 이외에도 식물 플랑크톤량을 측정하기 위한 형광광도계, 샘플채집을 위한 펌프 등이 준비되어 있다. 송수파기의 전방 1~2m의 범위의 0.01m²를 대상으로 관측한다.

이 시스템을 이용하여 측정한 결과에 대하여 설명해 보면, SV의 등고선을 수심과 주파수에 따라 표시한 것이 그림 6(c)이다. (12)식의 역

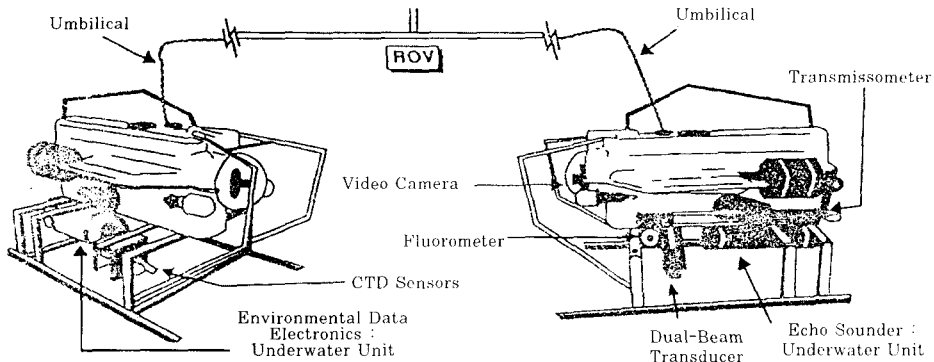


그림 4. 듀얼빔시스템을 탑재한 ROV(Green et al)

연산을 하이패스모델을 이용하여 계산한 결과를 등가구반경(ESR)으로 환산하여 플랑크톤의 분포를 나타내었다(d). 그림 중 콘터로 표시된 플랑크톤량의 단위는 $\text{mm}^2/\text{m}^2//0.01\text{mm}$, 즉 1m^2 의 해수 중의 생물량을 mm^2 로 나타낸 것이며, 등가구반경의 0.01mm 당의 플랑크톤량을 구하여 표시한 것이다. 수온(a)과 식물플랑크톤량의 지표인 형광광도(b)의 약층 부근에 플랑크톤량이 많은 것을 알 수 있다.

다) Georges Bank 조사 시스템⁽¹⁸⁾

이 시스템은 북서대서양의 Georges Bank의 대구류의 난치자의 해양환경변화의 영향을 조사하기 위한 대형의 복합적인 시스템이다. 음향, 광학, 네트 등의 샘플링기구와, 조사선, 계류색 등을 총동원하여 생태와 환경의 다이내믹스를 조사하였다. 사용되고 있는 음향시스템만으로도 아래에 나열하는 4종이 있다.

BIOSPAR(BIOacoustic Sensing Platform And Relay)

플랫 폼 : 원통 부이
 장 치 : 자동 듀얼빔 계량어군탐지기
 주 파 수 : 120, 420kHz
 결 과 : 100m 수심까지의 1m 당 SV
 신호처리 : 기억, ARGOS위성 통신, 조사선
 과 VHF무선 통신

Greene Bomber

플랫 폼 : 예항체
 장 치 : 듀얼빔 계량어군탐지기
 주 파 수 : 420, 1000kHz
 대 상 : 1.5mm~100mm의 동물 플랑크톤
 결 과 : 연속 프로파일

TAPS(Tracor Acoustic Profiling System)

장 치 : 다주파 시스템
 주 파 수 : 256, 420, 1100, 3000kHz의 4주파
 대 상 : 2~3m 앞까지의 copepod, 노프 리우스 유생 등

예항 시스템

플랫 폼 : 예항체
 장 치 : 듀얼빔 계량어군탐지기
 주 파 수 : 120, 200kHz
 대 상 : 광역의 다량어 플랑크톤
 결 과 : 수평 맵핑

이 시스템들은 대상생물을 이용한 시스템간의 교정이 가능하다.

라) Holliday 등의 계류시스템

Holliday와 Pieper는 대규모적인 계류형의 동물 플랑크톤 관측시스템을 개발하였다

(Pieper). 이 시스템은 로스앤젤레스 연안 22Km의 산페드로 해분수심 100m의 대륙사면에 설치되어 있다. 이곳은 환경요인과 생물생태계가 복잡하게 구성되어 있어, 해양 생태계 다이나믹스를 연구하는 최적의 장소이다.

계류시스템과 육상국은 VHF를 이용한 무선 시스템으로 연결되어 있으며, 육상국과 2개소의 연구소(Tracor와 남 캘리포니아 대학)와는 전화로 연결되어 있어, 리얼타임으로 측정파라미터나 데이터의 송수신이 가능하다.

부이는 직경 2m 크기이며, 컴퓨터, VHF 무선장치 등을 탑재하고 있다. 정보로서는 동물 플랑크톤량과 크기의 시간적 변화 및 각종 해양 정보(각층의 수온과 조도, 해면상의 기온, 풍력, 조도)를 한시간에 수회, 수개월간 연속적으로 측정하고 있다. 현재 아래의 3종의 음향센서를 장착하고 있다.

2주파시스템

- 방 식 : 2주파의 SV측정(현장)에 의한 크기와 양 계산(육상)
- 주 파 수 : 165kHz, 1140kHz
- 빔 : 수직방향 6° 수평방향은 무지향성
- 장 비 : 10m부터 80m사이에 10개
- 기 타 : 조도와 수온 센서

듀얼빔시스템

- 방 식 : 듀얼빔방식에 의한 TS, SV의 측정, 에코파형의 통계적 해석
- 주 파 수 : 165kHz
- 대 상 : 크릴새우와 치자어의 관측이 주(主)
- 장 비 : 25m 깊이 부근

다주파 측정시스템

- 방 식 : 다주파 SV측정, 역연산에 의한 크기별 생물량
- 주 파 수 : 100, 165, 265, 420, 700, 1100, 1850, 3000kHz의 8주파수
- 장 비 : 25m 깊이부근

이 시스템은 시험단계로서 이미 크릴새우와 Copepod를 대상으로 실험 중에 있으며, 앞에서 설명한 2주파방식을 이용하여 크기와 양을 측정하고 있다.

3) GLOBEC의 제안

이러한 음향시스템과 그것을 이용한 계측은 GLOBEC의 활동에도 포함되어 있으며, 또 아래에서 설명하는 GLOBEC의 워킹그룹의 제안 배경 또는 앞으로 실현하고자 하는 목표이기도

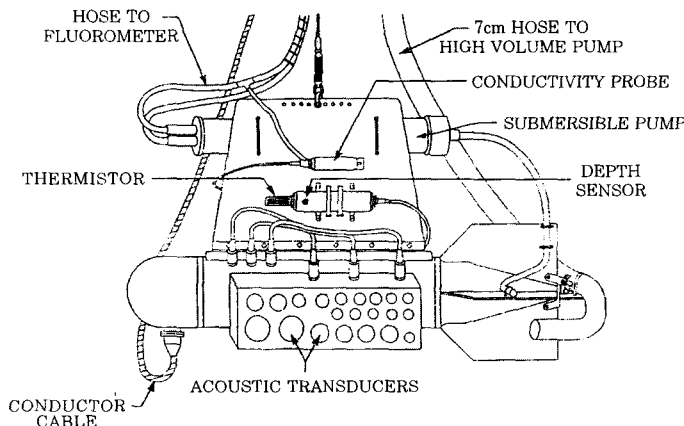


그림 5. 다주파 측정 센서(Pieper and Holliday)

하다. 여기에서 1991년과 1993년에 개최된 음향계측 관계의 두 워킹그룹이 제안한 내용을 간단히 소개하겠다.

가) 「음향기술 및 음향과 광샘플링의 종합화에 관한 워크숍」

1991년에 미국의 Woods Hole에서 개최되었으며, 당시 제안한 내용들이 보고서⁽¹⁹⁾로 나와 있다. 이 보고서는 금후 플랑크톤 음향기술을 개발하고자 하는 이에게 많은 도움이 될 것이다. 이 보고서로부터, 플랑크톤의 음향 계측에 관한 내용을 간단히 요약하면 다음과 같다.

플랑크톤은 음향기술만으로는 충분한 계측을 할 수 없어, 네트 또는 펌프, 광기술, 해양물리 관측 등 복수의 기술을 종합해야만 비로소 필요한 정보를 얻을 수 있다. 음향기술의 임무로서는 분포, 생물량, 크기 분포를 구하는 일이다. 다주파방식과 스프리트빔 방식 또는 다주파방식과 듀얼빔 방식의 2종의 방식을 조합하여 사용하는 것을 권장하며, 장착하는 방법은 조사선을 이용하는 경우에는 선저장비, 예항, 예항-상하(two-yo), 네트 등에 장착하는 방법이 있으며, 고분해능을 기대하는 경우는, 가까이 접근할 필요가 있으므로, 예항, 수하, ROV 등의 방식을 이용할 수 있다. 장기관측을 할 경우는 표류부이, 중립부이, 해저설치, 부이 등에 설치해야 하고, 목적과 대상의 결정에 따라 실험장치를 선택하여야 한다. 데이터의 처리방법 중 1단계 처리는 부이 내부에서 이루어지며, 그 결과를 리얼타임으로 전송 가능하게 하든지 내부 기억장치에 수록되도록 해야 한다. 측정장치는 표준화된 것이 없기 때문에 필요에 따라 선택한다. 즉, 각 부분의 계측을 분업화하여, 카드 플러그인 방식을 채용하여, 조립한 후 각종의 시스템이 구성되도록 한다. 또 장기관측형의 경우는 전력을 절약해야 할 필요도 있다. 주파수에 관해서는 약간 대형의 생물을 대상으로하는 경우는 38kHz~420kHz의 범위의 3~10파가 필요하다.

같은 생물을 대상으로 샘플링하기 위해서는

동시에 송파함과 동시에, 대상생물이 모든 진동자의 빔폭내에 위치하도록 한 후 측정해야 한다. 1~20mm 정도 소형 플랑크톤을 대상으로 하는 경우는 100kHz~3MHz의 범위로 5단계 크기별로 나누어 측정한다. 조금 변형된 방법으로는 소모형 프로파일 Expendable Acoustic Profiler(EAP)를 이용하는 방법도 있다.

나) SOS 워킹 그룹

1993년 3월 30일~4월 2일에 파리에서 GLOBEC의 Sampling and Observation System의 워킹그룹(SOS-WG) 회의가 개최되었다. 이 회의에서도 음향샘플링이 큰 테마로서 논의되었다. 이 워킹그룹에서 작성한 '음향 시스템의 설계와 장비의 고찰'이라는 제목을 붙인 보고서의 1장에서도, 앞에서 말한 측정방법이 제안되어 있지만, 몇 가지의 기술적인 진보가 있었다. 아래에 진보된 2개의 시스템을 소개한다.

고주파 시스템

대 상 : 100 μ m~3mm의 동물플랑크톤
주 파 수 : 100kHz~10MHz의 20주파수
장 비 : 가변심도

저주파 시스템

대 상 : 어류와 다랑어 동물플랑크톤
주 파 수 : 10kHz~500kHz의 15주파수
빔 : 몇 개의 주파수에서는 듀얼빔 또는 스프리트빔의 복수빔
장 비 : 일정심도

또, 종래의 협대역의 송수파기 이외에 광대역의 송수파기를 이용하게 되면 더 많은 정보를 얻을 수 있다. 여기에서는 대상생물의 식별에 대해서도 제안하고 있다. 고주파 시스템에서는 대상으로 하는 생물과 어류나 해파리 등의 큰 에코를 반사하는 것을 자동적으로 식별하기 위한 고찰이 새로이 첨가되었다. 예를 들면, (1) 레벨을 이용한 식별, (2) 주파수 특성을 이용한 식별, (3) 사진이나 비디오 화상을 이용한 식

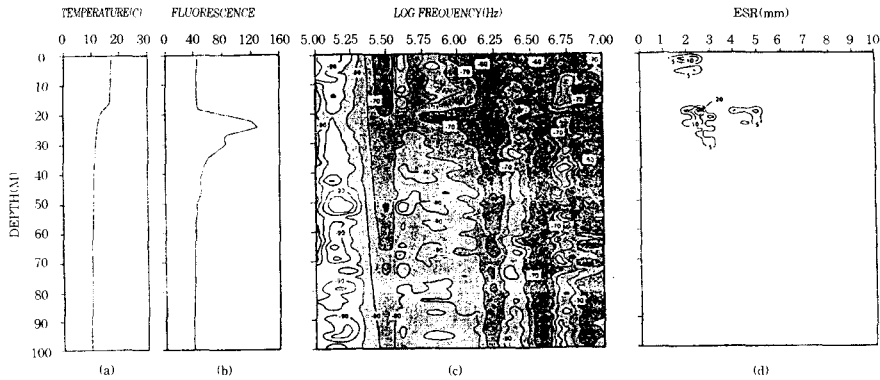


그림 6. 다주파 측정에 의한 플랑크톤의 측정결과(Mitson and Holliday)
 (a) 수온, (b) 형광광도, (c) SV, (d) 추정된 플랑크톤의 양

별, (4) 빛이나 전기로 자극을 주어, 예를 들면 Copepod를 놀라게 하여 그에 대한 반응도플러를 감지하여 측정 대상만을 검출하는 방법 등을 제안하고 있다. 저주파 시스템에서는 복수빔을 이용하여, TS 분포나 분포 밀도의 크기로부터 어류와 동물 플랑크톤의 구별이 가능할 것으로 생각한다.

SOS-WG의 '샘플링 방법'의 섹션에 대해서 잠시 소개하고자 한다. 여기에서는 공간통계학 geostatistics^[20]를 이용한 데이터해석에 대하여 제안하고 있다. 플랑크톤이나 어류의 분포, 해양환경정보 등은 공간의 좌표에 대해서 얻어진 통계량이다. 따라서, 데이터해석 또는 조사설계의 단계에서 통계적 고찰이 필요하다. 종래에는 일반적으로 공간적 독립성을 가정한 방법이 이용되어 왔지만, 이러한 경우 공간적 상관성이 높은 데이터해석과는 거리가 멀다. 이와같은 배경으로부터 수산음향데이터는 geostatistics를 적용해야한다는 의견이 ICES를 중심으로 이루어지고 있으며, 1988년, 1989년, 1990년의 3회에 걸쳐 워크숍이 개최되었다.

이 방법의 기본이 되는 것은 바리오그램 (variogram)이라고 불리는 공간적 분산을 나타내는 그래프이며, 바리오그램의 횡축에는 샘플점 간의 거리, 종축에는 분산을 표시한다. 이

것이 데이터의 구조를 나타내는 함수가 된다. 이것에 모델을 적용시킨 후, 분산이나 보간 등의 해석을 행한다. 이 방법의 최대 장점은 샘플링 방법 등도 고려한 현실적인 분산을 임의의 점에서 구할 수 있다는 것이다. 데이터의 공간적인 보간(Kriging)을 통하여 임의의 점에서의 값을 추정할 수 있어, 자동적으로 콘터를 그릴 수도 있다. 수산음향데이터에서의 geostatistics 응용은 이미 진행되고 있으며, 그 성과는 수산자원의 추정정도를 높이는데 크게 기여할 것이다.

4. 결 언

한국어선협회가 한국선박안전기술원으로 개명한 것을 축하드립니다. 아울러 귀원의 무궁한 발전을 기원하는 바입니다. 그리고 이 글은 일본 동경수산대학의 古澤昌彦(Furusawa Masahiko) 교수님이 정리하신 글을 참고하였음을 밝혀드리며, 본 글을 두서없이 소개하는 무례함을 널리 양해해 주시길 바랍니다. 또한 본 글이 선박안전기술원의 발전 뿐만 아니라 우리나라의 수산업의 선진화에 조금이나마 기여하길 빌면서 필자의 소견을 끝으로 이 글을 맺고자 합니다.

수산음향계측기술은 앞에서 말한 바와 같이

급속도로 발전해 왔습니다. 이는 미국, 북유럽(노르웨이, 영국, 프랑스, 덴마크 등)의 많은 연구자들이 꾸준히 노력한 결과라고 생각됩니다. 또한 국가, 대학, 연구소, 기업이 하나의 목표로 공동 노력하여 거두어진 결실이라고 생각됩니다. 이들 나라에서는 먼저 조사대상이 되는 생물에 대하여 전문적 지식을 가진 생물학자들에게 의해 기술개발의 필요성이 제안되었으며, 전기·전자 하드웨어의 기술을 갖춘 연구소나 기업의 동참과 더불어 그것을 실용화할 수 있는 데이터 분석 소프트웨어의 개발까지 일련의 연구체계가 갖추어져 있었기 때문에 이루어 낼 수 있었다고 생각됩니다. 또한, 기술개발을 위해 이들 조직과 체계를 지속적으로 지원한 국가의 역할 역시 무엇보다 큰 몫을 한 것으로 생각됩니다.

최근 우리 나라에서도 국립수산진흥원을 비롯하여 한국해양연구소 그리고 부경대학교를 비롯한 수산계 대학들이 공동으로 이 분야에 대한 연구를 계속해서 진행하고 있습니다만, 인력, 시설, 유지비 등의 부족으로 아직까지는 성과를 올리지 못한 것이 현실입니다. 본문에서 언급했던 바와 같이 음향을 이용한 자원조사는 수산자원을 파악하여 보존·관리하는데 필요한 기술로서 거의 실용화단계에 와 있습니다. 그러므로 이 분야에 대한 정부, 기업, 대학, 연구소 등의 상호협력체제의 구축을 통하여, 우리 나라 연안 수산자원의 효율적 관리·이용을 위한 계획을 수립할 것을 제안합니다.

參 考 文 獻

- [1] R.H.Love : "Resonant acoustic scattering by swim-bladder-bearing fish", *J. Acoust. Soc. Am.*, 64, 571-580 (1978).
- [2] 古澤昌彦 : "氣泡と音波-鰾と魚による超音波散亂", *海洋音響學會誌*, 16(4) (1989).
- [3] V.C.Anderson : "Sound scattering from a fluid sphere", *J. Acoust. Soc. Am.*, 22, 426-431(1950).
- [4] R.K.Johnson : "Sound scattering from a fluid sphere revised", *J. Acoust. Soc. Am.*, 61, 375-377(1977).
- [5] M.Furusawa : "Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength", *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 9(1), 13-24 (1988).
- [6] M.Furusawa, Y.Miyanohana, M.Ariji and Y.Sawada : "Prediction of krill target strength by liquid prolate spheroid model", *Nippon suisan Gakkaishi(submitted)*.
- [7] T.K.Stanton : "Sound scattering by zooplankton" *Rapp. P-v Réun. Cons. int. Explor. Mer.* 189, 353-362 (1990).
- [8] K.G.Foote, I.Everson, J.L.Watkins and D.G.Bone : "Target strength of antarctic krill(*Euphausia superba*) at 38 and 120kHz", *J.Acoust. Soc. Am.*, 87(1), 16-24(1990).
- [9] 池田勉 : "動物プランクトン(混合個体群)", *海洋學會春期大會講義要集(シンポジウム "プランクトンの生産をめぐる諸問題")*, 386(1987).
- [10] C.F.Greenlaw : "Acoustical estimation of zooplankton populations", *Limnol. Oceanogr.*, 24(2), 226-242 (1979).
- [11] D.N.MacLennan and E.J.Simmonds : *Fisheries Acoustics*(Chapman & Hall, London, 1992).
- [12] D.B.Holliday : "Extracting bio-physical information from the acoustic signatures of marine organisms", in *Ocean Sound Scattering Prediction*, N.R. Andersen And B.J. Zahuranec, Eds.(Plenum Press, New York, 1977).

-
- p. 619-624.
- [13] R.K.Johnson : "Acoustic estimation of scattering-layer composition", J. Acoust. Soc. Am., 61, 1636-1639 (1977).
- [14] C.H.Lawson and R.J.Hanson : Solving Least Squares Problems (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974).
- [15] C.H.Greene, P.H.Wiebe, R.T. Miyamoto, and J.Burczynski : "Probing the file structure of ocean sound scattering layers with ROVERSE technology", Limnol. Oceanogr., 36(1), 193-204(1991).
- [16] R.B.Mitson and D.V.Holliday : "Future fisheries acoutics", Rapp. P. - v. Réun. Cons. int. Explor. Mer, 189, 82-91(1990).
- [17] R.E.Pieper, D.V.Holliday and G.S.Kleppel : "Quantitative zooplankton distributions from multifrequency acoustics", J. Plankton Res., 12, 433-441(1990).
- [18] Anon. : "U.S. GLOBEC NEWS" No. 3, May 1993.
- [19] Anon. : "GLOBEC workshop of acoustical technology and the integration of acoustical and optical sampling methods", GLOBEC Report NO. 4(1991).
- [20] E.J.Simmonds, M.J.Williamson, F.Gerlotton and A.Aglen : Acoustical Survey Design and Analysis Procedure : A Comprehensive Review of Current Practice, ICES Cooperative Report No. 187(ICES, Copenhagen, 1992).