

동물플랑크톤에 의한 후방산란강도 및 체적복반사율의 예측

나 정열, 강 돈혁, 오 선택
한양대학교 지구해양과학과

Prediction of Backscattering Strength and Volume
Reverberation by Zooplankton

Jung-Yul NA, Don-Hyug KANG, Sun-Taek OH
Department of Earth & Marine Sciences, Hanyang University
Ansan, Kyunggi-do 425-791, KOREA

요 약

한국 근해에서 능동소나(active sonar) 사용시 사용되는 environmental parameters 가운데 하나인 volume reverberation(RE_v)을 산출하기 위하여 플랑크톤에 의한 후방산란 강도(backscattering strength)에 대한 연구를 하였다. 이를 위하여 수산진흥원 자료(80-89년)중 부유생물조사표에서 후방산란 강도가 다른 종에 비하여 큰 copepoda의 개체수를 평균한 후, 수심별 개체수를 계산하여 수심별, 주파수별(10, 50kHz), 계절별(2월, 8월) 후방산란 강도와 multipath eigenray model을 이용하여 RE_v를 산출하였다.

예로 사용한 동남해역(zone:83), 서해중부해역(zone:81)에서 주파수별 RE_v는 일반적인 형태인 초기에는 고주파가 높고, 1.5초 이후에는 저주파가 높게 나타났다. 그러나 여름이 겨울보다 플랑크톤 개체수가 많아 후방산란 강도가 크지만(2-50dB), RE_v는 겨울이 더 크게 나타났다. 이러한 이유는 SVP profile에 의한 pressure 계산결과, 여름에는 ray가 down-ward이고 겨울에는 duct를 형성하여 ray가 거의 direct로 진행하므로 transmission loss가 여름이 크기 때문이다. 또한 ray tracing결과 여름철에는 ray crossing이 많아 겨울에 비하여 fluctuation이 심하게 나타나는 현상을 보이고 있다.

두 지역 이외에도 한국근해의 정확한 RE_v을 예측하기 위해서는 플랑크톤의 정확한 측정과, 이론적인 수치의 비교할 수 있는 실측치를 얻는것이 필요하다고 볼수있다.

1. 서 론

해수중에서 음원으로부터 방사되는 음파의 산란은 해양 환경 요소(environmental factors)에 의하여 크게 영향을 받는다. 이러한 환경요소를 크게 물로 나누면 플랑크톤과 같은 생물학적 요소와, 수중음속 분포, 지형상대, 비탄에 의한 매질의 상하와 같은 비생물학적 요소로 나눌수 가 있다. 비생물학적 요소는 물리적인 현상으로 규명이 가능하나, 생물학적 요소는 생물량의 수치분포 변화가 심하기 때문에 관측하기가 힘들고 따라서 예측도 어려운 실정이다.

한편 ADCP(Acoustical Doppler Current Profiler)를 이용한 산란측정이 관측의 어려움을 해결해주고 있으나 절대값을 얻기에는 아직 부족할 실정이다. 그러나 체적산란을 아끼지키는 동물플랑크톤과 비탄에 의한 공기방울의 수치분포를 예측하기위한 시도는 절대 필요하다. 따라서 본 논문에서는 한국 해역에서 동물플랑크톤의 수치분포와 어떠한 후방산란 강도(backscattering strength)를 근거로 volume reverberation level을 계산하기위한 과정을 기술하였다.

II. 동물플랑크톤의 수치적 분포

한국해역에서 채집된(수산진흥원(FRDA) 자료) 동물플랑크톤 가운데 copepoda를 대표적인 종으로 선정하였다. Copepoda를 주종으로 선정한 이유는 다른 동물플랑크톤(noctiluca scintillans, cladocerans, ostracods)에 비해 후방 산란강도가 크기 때문이다(최 계영, 1991). 수산진흥원(수선원) 정선관측 자료중 부유생물 자료는 각 수심별 분포를 측정안것이 아니라 수심 100m에서 표면까지 전 층의 개수만 측정하기 때문에 동물플랑크톤의 수치분포를 알수가 없다.

현재까지 국내에서 수별 플랑크톤의 개수를 조사하거나 계산한 논문으로는 남동해역에서 ADCP와 플랑크톤 net을 이용해서 수별 플랑크톤 개수와 산란강도를 계산한 것이 전부이다(박 정수(89'), 최 계영(91')). 최의 논문에서는 Data의 신뢰성을 높이기 위하여 수별 플랑크톤 분포 조사를 간접적인 방법(ADCP)과 직접적인 방법(plankton net)을 동시에 사용하였다.

본 논문에서는 FRDA 관측치를 이용하여 플랑크톤의 수치분포를 예측하기 위하여 한 개의 정점에서 수치분포를 얻은 최의 논문을 이용하였다. 즉 최의 논문에서 copepoda의 각 층(8m 간격)의 개수를 평균하여 계산한 후, 전체 개수에서 각 층의 개수를 나누어 수별 copepoda의 수를 ratio로 나타냈다(Table 1). Table 1의 ratio를 다른 해역에서 획일적으로 적용시킨다는것은 정확성에 문제가 있지만 ratio를 보면 층상 수평성의 특징을 지닌 플랑크톤의 수치적분포가 수온약층부근 혹은 층상에 patch를 이루며 형성된다는 일반적인 분포와 유사성을 지니기때문에 이 ratio를 사용하고자 한다.

depth*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ratio(%)	2.0	4.1	2.4	5.5	5.2	9.5	10	13	9.0	15	8.5	11.0	6.5

Table 1. Depth 별 플랑크톤 분포 비율(* bin depth : x 8m)

플랑크톤의 총 수는 수선원에서 80m에서 89년까지 측정된 부유생물 data를 평균하여 사용했다. 예로 사용한 동남 해역(208.209line, zone # 83)과 서해 중부 해역 (310.311 line, zone # 81)의 겨울(2월)과 여름(8월)의 수별 플랑크톤(copepoda)의 개수는 아래 도표와 같다(Table 2). 이때 zone 설정은 임의로 설정한 지역으로 매지연의 지질상태중 bottom porosity가 유사한 지역으로 구분하였고 동남해역과 서해 중부 해역을 구분한것은 해수특성이 다른 지역을 비교하기 위해서이다. (Fig. 2-1).

depth(m)	zone # S3		zone # W3	
	Feb.	Aug.	Feb.	Aug.
0 - 8 m	9	13	8	20
9 - 16 m	18	27	15	40
17 - 24 m	14	20	11	30
25 - 32 m	27	40	23	60
33 - 40 m	23	34	19	50
41 - 48 m	48	71	41	106
49 - 56 m	50	74	43	113
57 - 64 m	59	88	51	132
65 - 72 m	43	64	37	97
73 - 80 m	73	108	62	161
81 - 88 m	39	57	33	84
89 - 96 m	52	80	46	119
97 -104 m	32	47	27	72

Table 2. Depth vs. plankton number

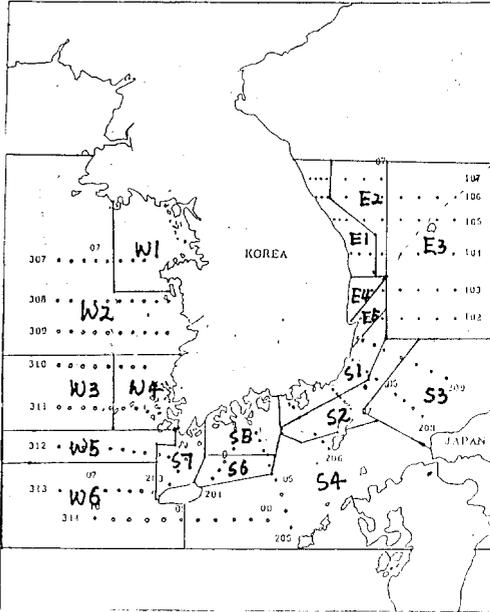


Fig. 2-1 The study area showing PRDA station

II. 후방산란 강도 (Backscattering strength)

j) Backscattering cross-section (σ_{bs})

해수중에 존재하는 산란체(주로 동물플랑크톤)에 음파가 입사될 때 산란체는 음파의 진행을 방해하며 부딪힌 음파를 여러 방향으로 산란시킨다. 이때 receiver와 source가 한 곳에 위치한다고 할 때 receiver 방향으로 음파를 산란시킬 수 있는 면적을 제어 후방산란 단면적(volume backscattering cross-section, σ_{bs})이라 한다. 이때 σ_{bs} 는 단위계체의 단면적으로 개체수와 단면적은 비례한다.

$$\sigma_{bs} = \frac{a^2}{[(f_{RF}/f)^2 - 1] + \delta^2} \quad , \quad \text{(Eq. 3-1)}$$

where a = equivalent radius(m)
 f_{RF} = resonancy frequency(Hz)
 f = source frequency(Hz)
 δ = damping constant

각 term 별로 간단하게 설명하면 아래와 같다.

1. Equivalent radius (Greenlav, 1977)

동물플랑크톤의 길이(L)를 가지고 내부에 있는 미세한 swim bladder의 반경을 구하는 공식으로 다음과 같다.

$$a = 0.207 * L - 0.044 \quad , \quad \text{(Eq. 3-2)}$$

2. Resonancy frequency (McCarthey, 1970)

source frequency와 플랑크톤 내부에 있는 swim bladder의 natural frequency가 일치하면 공명현상이 발생하고 이에 부딪힌 음파는 전방향으로 산란되어 후방산란강도가 증가하게 된다.

$$f_{RF} = \frac{[(3\gamma P_A + 4\mu_s + 3t/a)/\rho_A]^{1/2}}{2\pi * a} \quad , \quad \text{(Eq. 3-3)}$$

where γ = the ratio of specific heat of the swim bladder gas (= 1.4)

μ_s = elastic shere modulus of bladder membrane(10⁸Pa)

ρ_A = ambient density (= 1.03*10³kg/m³)

P_A = ambient pressure (= 10⁵*(1+0.12) N/m²)

t = thickness of swim bladder tissue (= 0.2a)

3. Damping constant (H. Medvin, 1977)

물리적으로 attenuation을 일으키는 damping은 thermal conductivity, shere viscosity, reradiation때문에 발생한다. 일반적으로 damping constant를 0.0136으로 사용하나, 이 값을 계산과정에 이용했을 때 비이상적으로 길이 크면 어제의 값을 사용해서 damping constant를 계산해야 한다.

1) δ_r = damping constant due to reradiation.
 $= ka$, (Eq. 3-4)
 where k = wave number = $\omega/C = [(2\pi * f_{RF})/C]$
 a = bubble radius(μ m)

2) δ_k = damping constant due to thermal conductivity
 $= (d/b)/(f/f_k)^2$, (Eq. 3-5)

$$\frac{d}{b} = 3(\gamma - 1) \left[\frac{X(\sinh X + \sin K) - 2(\cosh X - \cos K)}{X(\cosh X - \cos K) + 3(\gamma - 1)X(\sinh X - \sin K)} \right]$$

γ = the ratio specific heats of gas (=1.4 for air)

$$K = a [2\omega \rho_A C_{p,g} / K_g]^{1/2}$$

where

K_g = thermal conductivity of gas [= 5.6*10⁻⁸cal/(cm)(s)(°C)]

ρ_g = density of gas = $\rho_{air} [1 + 2\pi / (P_A a)] [1 + 0.12]$

ρ_{FA} = density of free gas at sea level [= 1.29*10⁻³g/cm³]

π = surface tension (=75.dynes/cm for air-water surface)

P_A = 1.013*10⁵(1+0.12)

$C_{p,g}$ = specific heat at constant pressure of gas (=0.24cal/g)

3) δ_v = damping constant due to shear viscosity
 $= 4\mu / \rho_A \omega a^2$, (Eq. 3-6)
 where

μ = shear viscosity of water [0.01 g/(cm)(s)]

ρ_A = water density [1.035g/cm³]

h) Backscattering strength

Eq. 3-1은 단위면적을 나타내므로 개체수에 따라 전체 후방산란 단면적(S_v)은 달라진다. 즉 단위면적과 개체수의 곱을 더한 값이 S_v이다.

$$S_v = \sum N_i \sigma_{bs} \quad , \quad \text{(Eq. 3-7)}$$

이 상의 과정으로 계산한 S에 10.log를 취하여 나온 결과가 후방산란 강도이다.

$$\text{후방산란강도} = 10 \cdot \log (S_e) \quad , \quad (\text{Eq. 3-8})$$

Table 2.에서 예로 사용한 동남해역(S3)과 서해 중부 해역(W3)의 후방산란 강도계산에서 depth는 각 층의 중간 depth를 취했으며 source frequency는 low frequency, high frequency로 10, 50 kHz를 사용하였다. 또한 계절적인 변화를 알아보기 위하여 2월과 8월의 산란강도를 각각 계산하였다(Fig. 3-1, 3-2).

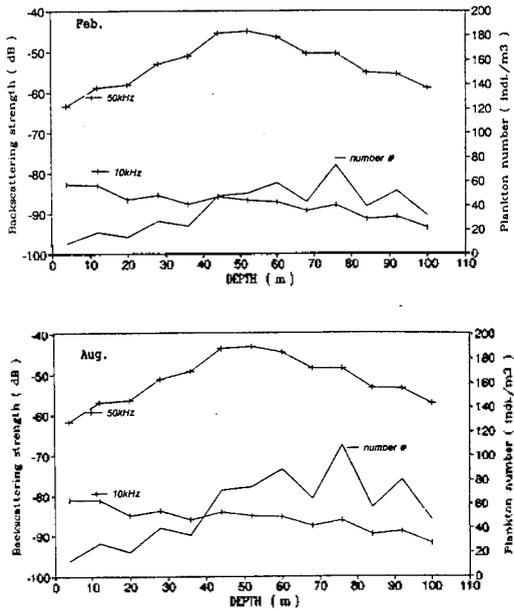


Fig. 3-1 Depth vs. backscattering strength of S3 (Feb., Aug.)

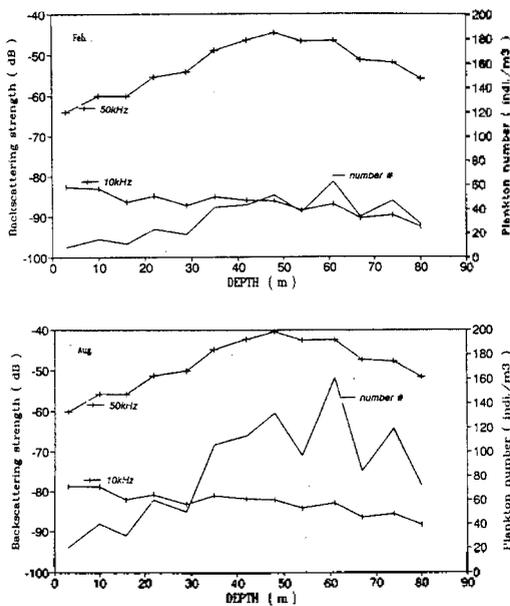


Fig. 3-2 Depth vs. backscattering strength of W3 (Feb., Aug.)

Fig. 3-1을 보면 동남 지역에서 여름, 겨울을 비교하면 주파수별로 약 5dB 차이가 나며, depth를 보면 low frequency에서는 선형적으로 감소하나, high frequency에서는 중층(40-70m)에서 dB값이 크게 나타난다.

Fig. 3-2도 마찬가지로 여름, 겨울을 비교하면 약 2dB 정도의 작은 차이가 난다. W3에 비해 작은 이유는 계절별 플랑크톤 수의 차이가 대한해역을 통하여 겨울에도 대안류가 이동하기 때문에 서해중부해역에 비하여 수온약층부근의 수온이 겨울에도 수온이 높기 때문일것이라고 여겨진다. Depth를 보면 서해중부와 유사하게 low frequency에서는 선형적으로 감소하나, high frequency에서는 중층(40-70m)에서 dB값이 크게 나타난다. 이상으로 보면 동통출렁크론의 분포에 따라 후방 산란강도가 크게 영향을 받는다는것을 알수가 있다.

N. Volume reverberation (REV)

REV는 음원(source)으로부터 방사된 음파가 수중에 분포하는 산란체들에 의하여 산란되어 receiver로 돌아오는 산란음속의 합으로 정의된다. REV를 간단한 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$REV = SL - 40 \log(r) - 2\alpha r + S_v + 10 \log(V) \quad , \quad (\text{Eq. 4-1})$$

where SL = source level
 r = reverberation range
 α = absorption coefficient
 S_v = volume backscattering strength
 V = insonified volume

W3에서 후방산란 강도는 여름이 겨울보다 크게 나타나 REV가 여름이 더 클것이라고 예상했었다. 그러나 Fig. 4-1의 sound velocity profile(SVP)과 Fig. 4-2의 pressure vs. range를 보면, 음파가 이동시 겨울에는 horizontal하게 이동하며, 여름에는 ray가 down-ward로 이동하기 때문에 ray 이동에 따른 transmission loss와 bottom에 의한 loss가 산란체에 의한 손실강도보다 여름에 더 크게 나타났다. 즉 ray가 겨울에는 direct path로 이동하기 때문에 산란체가 겨울에도 불구하고 REV값이 여름보다 크게 나타나는 현상을 보였다(Fig. 4-3). 이러한 현상은 S3에서도 유사하게 나타나나, 고주파에서는 range 보다 후방산란강도가 REV에 영향을 더 주는것으로 나타났다(Fig.4-4).

또한 두 지역 모두 겨울에는 REV가 시간이 경과함에 따라 monotonic하게 감소하나, 여름에는 fluctuation을 일으키며 감소하는 양상을 보이고 있다. 이러한 이유는 ray tracing으로 설명이 가능한데 겨울에는 ray가 이동하면서 range 변화에 비하여 crossing 되는 곳이 적으나, 여름에는 크므로 REV값에 fluctuation이 발생한다.

이상의 결과로 후방산란강도와 REV를 비교하여볼때 후방산란강도가 크다고해서 반드시 REV가 큰것은 아니었다. 산란체가 많이 후방 산란강도가 크다고 할지라도 SVP에 따른 ray가 산란체를 통과하는 경로와 진행방향에 따라 REV level이 영향을 받는다는것을 알수가 있었다.

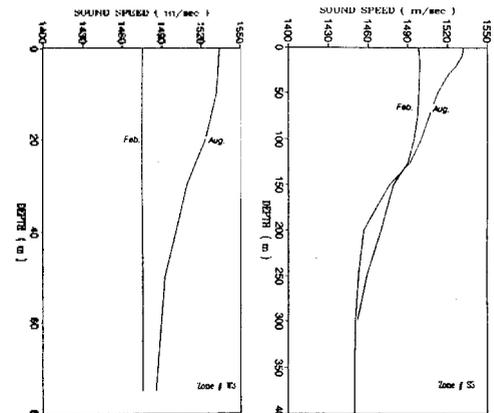


Fig. 4-1. Sound velocity profile (S3, W3)

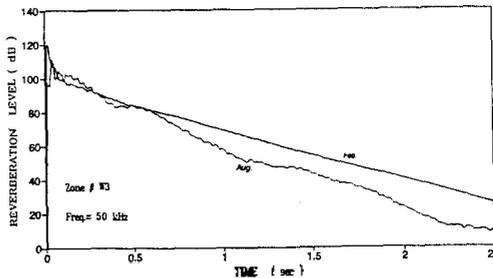
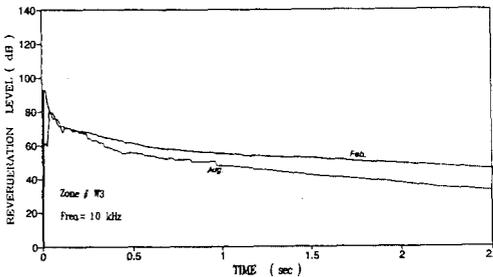
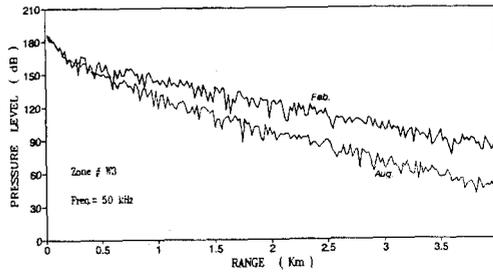
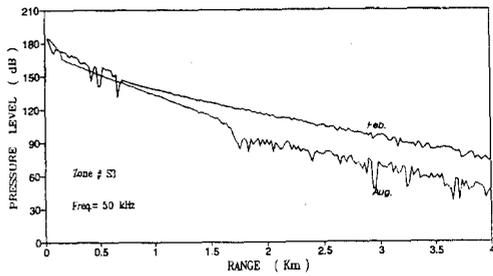


Fig. 4-3. Reverberation vs. Time (W3)

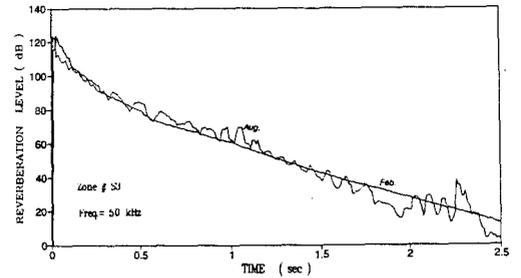
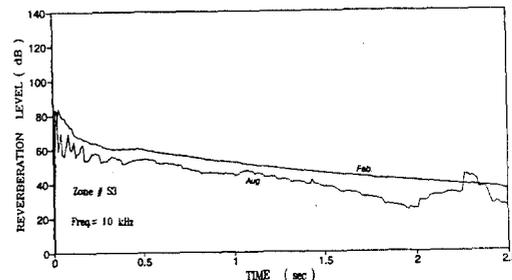


Fig. 4-4. Reverberation vs. time (S3)

V. 결 론

원하는 반사율을 구별해내기 위하여 제각각 의하여 나타나는 RE_v 를 수산음에서 제거해주어야 한다. 이러한 RE_v 를 결정하는 요소로 계층내의 산란체가 중요한 요소로 작용한다. 또한 계절에 따라 volume을 지나가는 eigenray와 pressure를 알기위하여 연구하고자 하는 영역의 SVP소기도 필요하다. RE_v 의 크기는 제각각에 의한 후방산란 강도, ray의 이동에 따른 음압의 손실경도, 사용 주파수에 의하여 복합적으로 결정된다.

VI. 보 의

수산전용된 자료에 통틀음향프론트의 수신된 자료가 없어서 ADCP data로 간접적인 방법을 취해서 volume reverberation을 예측하였다. 수신된 자료가 언도별로 편차가 심하여 data에 의한 error도 예상이 과나, 사용가능한 자료가 수신된 자료밖에 없었다. 수신된의 총괄 부유생물 data 수집과, data에 대한 계산치를 실측치와 비교할 수 있는 현장 측정치의 필요성이 대두되었다.

VII. 참고 문헌

1. 최 재영, 1991. "동해 남부해역에서의 음향을 이용한 통틀음향프론트의 수직분포에 관한 연구", 서울대 석사학위논문.
2. 박 경수, 1989. "천해에서 운동중인 음원에 의한 복반사음에 관한 연구", 한양대 석사학위논문.
3. C.S. Clay & H. Medvin., *Acoustical Oceanography*.
4. Robert J. Urick., *Principles of underwater sound*.
5. FRDA, 1980-1989. *Annual report of oceanographic observations vojune 29-39*. FRDA., Busan, Korea.