

음향자원조사를 위한 동물플랑크톤 요각류의 음향산란이론모델의 검토

황보규·신현옥^{1*}·이대재¹·이유원¹

부경대학교 해양산업개발연구소, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부

Examination of Theoretical Acoustic Scattering Models for Copepods in an Acoustical Zooplankton Biomass Survey

Bo Kyu Hwang, Hyeon-Ok Shin^{1*}, Dae-Jae Lee¹, You-Won Lee¹
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

Several theoretical acoustic scattering models were applied to estimate the target strength (TS) for assessing the biomass of zooplankton, to overcome the difficulty of direct measurements. Acoustical scattering characteristics of copepods were estimated using three theoretical models, and the application of the models was evaluated for four frequencies of a scientific echo sounder. The scattering directivity by the body shapes of copepods at 200 kHz and 420 kHz was significantly affected by TS patterns. Averaged TS, however, were similar at higher frequencies. Consequently, a low frequency model, such as a truncated fluid sphere model, provides a good acoustical biomass estimation. The regressions of TS and $30 \log L$ were $\langle TS_{200 \text{ kHz}} \rangle = 30 \log L - 118.4$ ($R^2 = 0.716$) and $\langle TS_{420 \text{ kHz}} \rangle = 30 \log L - 108.8$ ($R^2 = 0.758$), respectively.

Key words: Acoustical abundance survey, Theoretical acoustic scattering model, Zooplankton

서 론

해양에서 수많은 생물들은 복잡한 먹이관계를 형성하면서 상위단계의 생물들이 하위단계의 먹이생물을 잡아먹음으로써 에너지 이동이 이루어지므로, 일차생산자의 번성 여부는 수산자원의 증감을 수반한다 (Kim and Kang, 1999). 따라서, 플랑크톤은 지구환경과 어류와 같이 인간이 이용하는 수산자원에 중요한 영향을 미치는 기초생산자로서, 그 분포와 생물량의 변동은 매우 중요한 의미를 가진다. 동물플랑크톤 중의 대표적인 생물종으로 요각류 (Copepods)는 세계의 거의 모든 해역에서 발견되면서, 다른 분류군에 비해 월등하게 우세하여, 해양생태계와 해양생산력에 기여하는 바가 매우 크다.

플랑크톤의 분포 및 생물량의 조사는 해황, 지형, 예비지식 등에 기초하여 넓은 수역의 상태를 대표하는 동등한 소부분에 대해, 몇 개의 조사정점을 정하고, 채집망으로부터 얻은 측정치로부터 전체의 상태를 추정한다 (Oomori and Ikeda, 1976). 최근에는 LOPC (Laser Optical Plankton Counter), VPR (Video Plankton Recorder), 고주파의 과학어군탐지기 등의 다양한 계측장치들과 동시에 계측하므로써 추정 정확도를 향상시키거나 광역에 대한 조사를 실시하고 있다 (Herman et al., 2004; Benfield et al., 2000).

과학어군탐지기와 같은 음향장비를 이용하여 수중생물의 분포밀도를 추정하기 위해서는 대상이 되는 생물의 음향산란

특성인 Target Strength (이하, TS)를 파악해야 하는데, TS는 음향산란량을 개체의 분포밀도로 변환하기 위한 환산계수 (Scale factor)가 된다. 일반적으로 어류의 TS를 파악하기 위해서는 실내수조나 연안 가두리와 같은 시설에서 TS를 실측하고, 측정치의 검증을 통하여 자원량 추정에 사용하게 된다. 그러나, 동물 플랑크톤의 경우는 그 크기가 매우 작아 실측이 매우 어렵기 때문에 음향산란의 이론모델을 이용한 연구가 주를 이루고 있다.

초기의 동물 플랑크톤에 대한 음향산란 이론모델은 대상생물을 소형의 구체로 묘사하는 Fluid sphere model (Anderson, 1950; Johnson, 1977; Holliday, 1993), cylinder model (Stanton, 1987), Prolate spheroid model (Furusawa, 1988) 등의 엄밀모델이 주를 이루어 왔으나, 최근에는 형태를 세세하게 묘사하는 고주파 모델인 Distorted wave born approximation model (McGehee et al., 1998; 이하 DWBA) 모델이 개발되어 동물플랑크톤 이론모델은 정확도가 향상됨과 동시에 매우 복잡화되었다 (Stanton and Chu, 2000).

요각류의 음향산란특성을 규명하는 것은 동물플랑크톤의 생물량 조사뿐만 아니라, 어류자원조사를 위해서도 중요한 정보이다. 요각류의 음향산란추정에는 유체구 모델이 주를 이루어 왔으나, 유체구 모델은 음향시스템이 고주파화 되어감에 따라 체형에 따른 산란지향성을 구현하지 못한다는 점이 문제시 되기도 한다. 또한 고주파 모델은 대상생물의 형태를 매우 정확하게 묘사함으로써, 형태적인 부분에서 발생하는

*Corresponding author: shinho@pknu.ac.kr

음향산란패턴을 정확하게 묘사할 수 있으나, 계산을 위해 개체에 대한 체형정보를 얻는 과정이 매우 복잡하므로, 생물량 추정을 더욱 복잡하게 만든다. 따라서, 실제 음향조사를 통한 생물량 산출에 있어서 사용주파수에 대한 음향산란특성을 추정하고, 이론모델들 추정치를 검토하여 적용이 용이하면서도 정확도 높은 추정이 가능하도록 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 대표적인 동물플랑크톤인 요각류를 채집하여 크기를 측정하고, 과학어군탐지기의 주요주파수에 대한 고주파 근사모델과 엄밀모델에 의한 추정치를 비교하므로써 음향자원조사를 위한 요각류의 음향산란특성 적용 방법에 대하여 검토하였다.

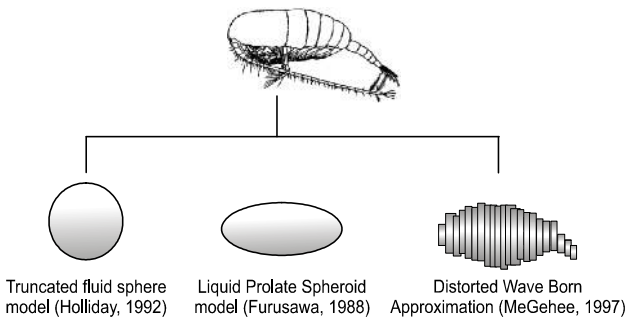


Fig. 1. Three theoretical acoustic scattering models to estimate target strength of Copepods.

재료 및 방법

본 연구에서 사용한 3종의 음향산란 이론모델을 Fig. 1에 나타낸다. Truncated Fluid Sphere (이하, TFS)모델 (Holliday, DV. 1993; Piper and Holliday, 1984)은 대체로 구형인 소형에 동물플랑크톤 음향산란에 추정에 사용되어 왔는데, TS는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$Ts = F(f, a_{esr}, g, h) \tag{1}$$

여기서, f 는 주파수, a_{esr} 은 등가구반경 (Equivalent Spherical Radius, 이하 ESR)으로, 대상으로 하는 플랑크톤과 동일 체적을 가지는 구의 반경을 의미하며, g 는 매질과 대상생물 사이의 밀도비, h 는 음속비를 나타낸다.

Prolate spheroid model (Furusawa, 1988)은 회전타원체로부터의 음향산란을 추정하는 엄밀모델로서, 무표어, 유표어의 부레와 같은 어류의 음향산란의 일반특성뿐만 아니라, krill과 같은 동물플랑크톤의 음향산란추정에도 사용될 수 있다 (Furusawa et al., 1994). 동물플랑크톤의 음향산란은 Liquid Prolate Spheroid (이하, LPS) 모델을 이용하여 추정할 수 있는데, 원거리 음장에서의 산란진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ts = F(f, a, b, \theta, \phi, g, h) \tag{2}$$

여기서, a 는 타원체의 장반경, b 는 타원체의 단반경, θ 는 대상생물의 자세각을 의미한다. 그리고, DWBA모델은 체형을 잘게 절단한 원통절편으로 근사하여, 음향산란을 추정하는 근사모델로서, TS는 다음의 식으로 표현된다.

$$Ts = F(f, b_{shape}, \theta, g, h) \tag{3}$$

여기서, b_{shape} 는 원통절편으로 근사한 체형자료를 의미한다. 이상의 3종의 이론모델에 대한 자세한 설명은 문헌으로 대체한다.

위 식에서 나타낸 바와 같이, 음향산란 이론모델을 이용하여 동물플랑크톤의 음향산란을 추정하기 위해서는 대상생물의 체형 또는 크기, 매질과 대상생물 사이의 밀도비, 음속비에 관한 자료가 필요하다. 체형자료의 경우, TFS모델은 대상생물의 체형은 구체로 근사하고, 그 크기는 구체의 반경으로 묘사하기 때문에, 대상생물의 체장과 등가의 체적을 가지는 구의 반경인 ESR의 관계를 파악해야 한다. 본 연구에서는 LPS모델로부터 추정한 체적과 동일한 구의 반경을 구하여, ESR을 추정하였다. LPS모델은 체장 (BL)방향의 반경인 a ($=BL/2$)와 체폭 (BW)방향의 반경인 b ($=BW/2$)를 가지는 회전타원체로 묘사되는데, 체장과 체폭은 디지털화하여 구하였다. DWBA모델은 대상생물의 체형을 잘게 잘려진 원통절편으로 근사한 세세한 체형좌표가 필요하다. 이에 본 연구에서는 스케일이 그려진 판 위에 샘플을 놓고, 디지털 카메라가 장착된 전자현미경을 이용하여 사진을 촬영한 다음, 디지털 화상에서 체형을 세세하게 디지털화하여, 체형 좌표를 얻었다 (Fig. 2).

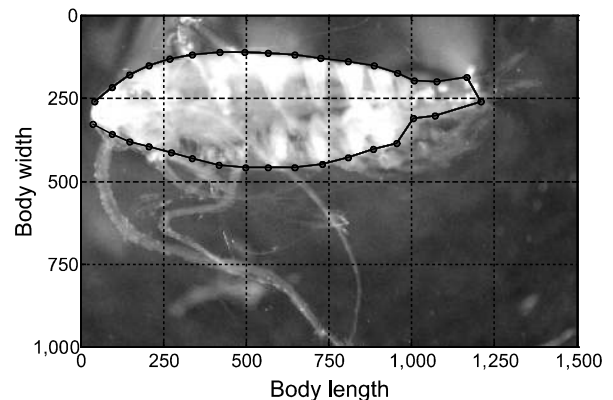


Fig. 2. Digitizing to extract body shape coordinates of copepods. Scales of axes are arbitrary.

또한, 3종의 이론모델 모두 밀도비 (g)와 음속비 (h)가 필요한데, TFS모델의 경우 $g=1.12$ 와 $h=1.09$ 의 비교적 높은 값을 적용하고 있다 (Pieper and Holliday, 1984). 그러나, Greenlaw and Johnson (1982)의 연구에서는 요각류의 g 는 1.0255 - 1.049, 음속비는 1.006 - 1.012 정도로 보고되었으며, 최근 Lavery et al. (2007)은 $g=1.02$, $h=1.058$ 를 적용하는 등의 생물종이나 이론모델의 특성 등에 따라 조금씩 차이를 보인다. 본 연구에서는 외양성으로 북대평양에 주로 분포하는 *Calanus*

*plumchrus*에 대한 값인 $g=1.047$, $h=1.012$ 를 적용하였다.

본 검토를 위해 체장범위 2.0 mm - 4.65 mm 사이의 총 17개체를 샘플에 대하여 3종의 이론모델에 의한 추정치를 비교하고, 과학어군탐지기의 주파수인 38 kHz, 120 kHz, 200 kHz, 그리고 420 kHz에 대한 음향산란의 특성을 검토하였다.

결과 및 고찰

요각류의 체형에 대한 타원체의 aspect 비를 Table 1에 나타내었다. 17개의 샘플로부터 추출한 aspect비는 평균 0.29, 표준편차는 ± 0.05 이었고, 최소값은 0.22, 최대값은 0.35로 나타났다. Lavery et al. (2007)은 복수종의 플랑크톤이 혼재한 플랑크톤 분포로부터 음향산란값을 추정하기 위해서, 요각류에 대해 aspect비를 Lawson et al. (2004)의 결과를 인용하여 체폭에 대한 체장의 비를 2.55로 사용하였다. 본 실험의 결과를 체폭에 대한 체장의 비로 환산하면 3.45로 본 연구에서 추정한 값과 다소 차이를 보였으나, 이것은 요각류의 성장단계 및 생물종에 따른 차이인 것으로 판단된다 (Lavery et al., 2007). 또한, 17개의 샘플로부터 추정한 요각류의 체장과 ESR의 관계는 Fig. 3과 같다. ESR과 체장 관계는 $a_{esr} = 0.132L + 0.268$ ($R^2 = 0.761$)이었다. Holliday and Pieper (1984)는 다주파 시스템을 이용한 $a_{esr} = 0.207L - 0.044$ 로 보고하였으나, 이 관계 역시 요각류의 성장단계와 생물종의 차이로 인한 것으로 판단되며, 해역에 따라 다소 차이를 나타낼 것으로 생각된다 (Fig. 3).

Table 1. Relationships between Equivalent sphere radius (a_{esr}) and major radius (a) and minor radius (b) of copepods

No	BL (mm)	BW (mm)	a_{esr} (mm)*	a (mm)	b (mm)	b/a
1	4.05	1.03	0.82	2.03	0.52	0.25
2	3.85	0.98	0.77	1.93	0.49	0.25
3	4.65	1.16	0.92	2.33	0.58	0.25
4	2.83	0.99	0.71	1.42	0.5	0.35
5	2.67	0.91	0.66	1.34	0.46	0.34
6	2.67	0.88	0.64	1.34	0.44	0.33
7	2.39	0.78	0.57	1.2	0.39	0.33
8	2.5	0.82	0.59	1.25	0.41	0.33
9	3.64	0.81	0.67	1.82	0.41	0.22
10	3.69	1.01	0.78	1.85	0.51	0.27
11	2.92	0.89	0.67	1.46	0.45	0.3
12	3.32	0.78	0.63	1.66	0.39	0.23
13	2.71	0.89	0.65	1.36	0.45	0.33
14	2.86	1.00	0.71	1.43	0.5	0.35
15	2.66	0.80	0.60	1.33	0.4	0.3
16	2.86	0.94	0.68	1.43	0.47	0.33
17	2.85	0.68	0.55	1.43	0.34	0.24
Min.	2.39		0.55			0.22
Mean (S.D.)	3.12		0.68			0.29
Max.	4.65		0.92			0.35

* $a_{esr} = 0.132L + 0.268$ (Fig. 3).

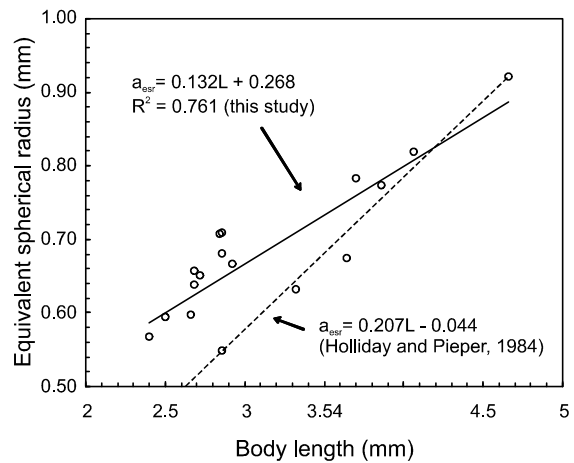


Fig. 3. Relationship between equivalent spherical radius (a_{esr}) and body length (L) estimated for 17 copepods.

개체 크기가 가장 컸던 #3에 대하여 3종의 이론모델로 추정한 주파수별 음향산란패턴은 Fig. 4와 같다. 38 kHz에서는 LPS 모델과 DWBA 모델에서도 길쭉한 체형에 따른 산란지향성이 거의 나타나지 않아 체형을 구형으로 근사하는 TPS 모델과 일치하였다. 그러나, 체형에 따른 산란지향성을 구현할 수 있는 LPS 모델과 DWBA 모델은 120 kHz 이상의 주파수에서 체형에 따른 산란지향성이 나타났는데, 주파수가 높아질수록 산란지향성의 영향이 커져, 두 모델과 TPS 모델 사이의 차이는 자세각에 따라 20 dB까지 변동하는 것으로 나타났다. 이로 인하여, 등방향 최대 TS 값은 TPS 모델에 의한 추정값이 나머지 두 모델로 추정한 값보다 약간 낮은 값을 나타내었으며, 주파수가 높아질수록 TPS 모델과의 차이가 커지는 경향을 보였다. 그리고, 420 kHz에서는 LPS 모델과 DWBA 모델에서도 등방향의 주엽만이 일치하는 특성을 보였으며, 입사각 등방향에서 벗어날수록 LPS 모델과 DWBA 모델 사이에서 큰 차이가 발생하였다.

3종의 이론모델로부터 추정한 200 kHz와 420 kHz에 대한 최대 TS 값과 평균 TS 값은 Fig. 5와 같다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이, TPS 모델은 산란지향성을 구현하지 못하기 때문에 200 kHz에서의 최대 TS 값은 LPS 모델과 DWBA 모델에 비해 약간 낮은 값을 나타내었지만 그 영향은 크지 않았다. 그러나, 420 kHz에서는 차이가 다소 크게 나타났으며, 개체의 체장이 커짐에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다.

Benfield (2000)는 요각류인 *Calanus finmarchicus*의 유영자 세각 변동에 대하여 조사하고, 평균 0° (수면방향), 표준편차 30° 의 분포를 나타낸다고 보고하였다. 이 결과를 토대로 요각류의 유영자 세각 변동에 대한 평균 TS를 추정한 결과, 3종의 모델에서 추정한 결과가 모두 유사한 값을 가졌으며, 420 kHz에 대해서도 큰 차이가 없었다. 따라서, 일반적으로 많이 사용되는 38 kHz부터 420 kHz까지의 과학어군탐지기 주파수에 대해서는 생물량 추정을 위하여 자세각 평균 TS 값을 적용할 때, 체형에 따른 산란지향성의 영향을 구현하는 고주파의 복잡한 모델이 아닌, 단순한 TPS 모델을 적용하여도 유의한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

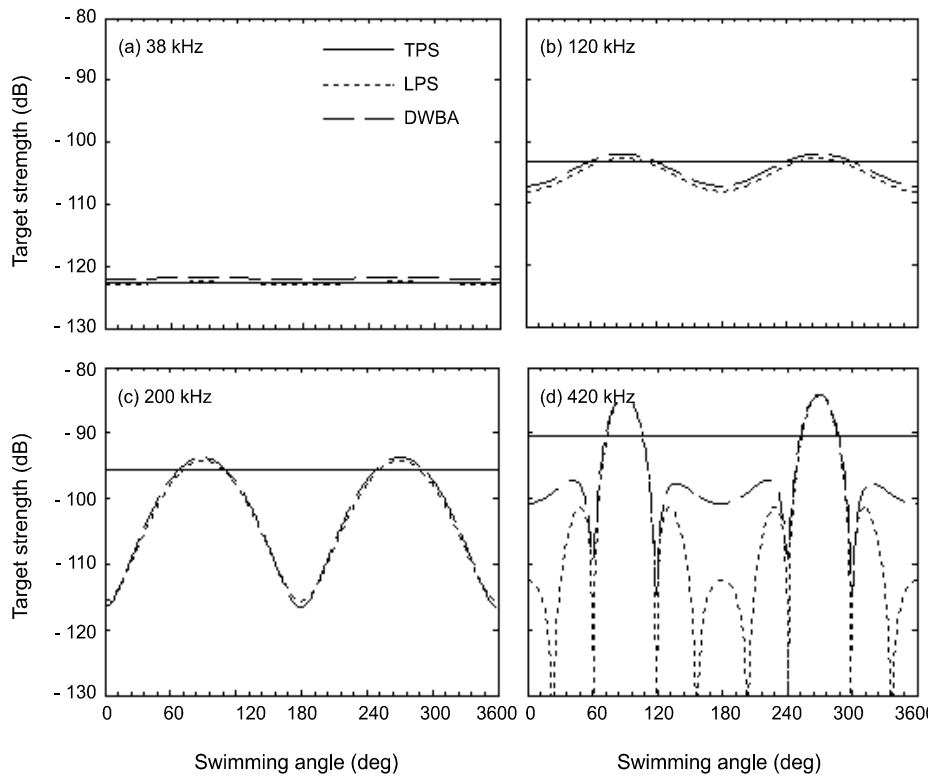


Fig. 4. Acoustic scattering patterns of #3 (BL=4.65 mm) for 38 kHz, 120 kHz, 200 kHz, and 420 kHz estimated by three theoretical models.

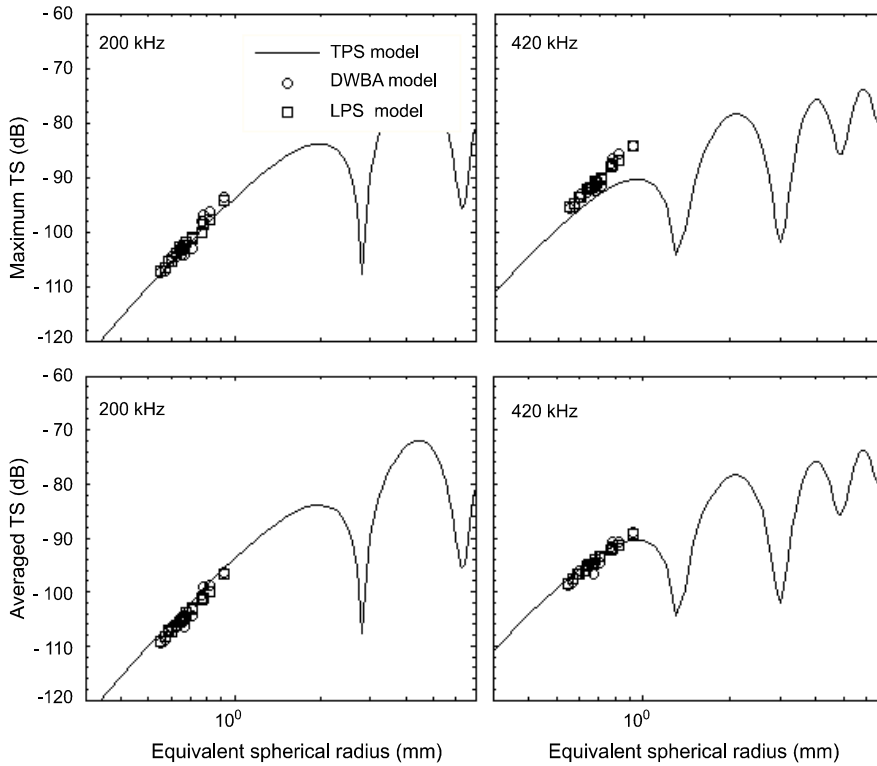


Fig. 5. Comparing maximum and averaged TS of 16 copepods at 200 kHz and 420 kHz estimated by three models. (μ, σ) of probability density function for swimming angle of copepods is $(0, 30)$.

DWBA모델로부터 추정된 요각류의 평균TS-체장, 평균TS-체적사이의 관계는 Fig. 6과 같다. 일반적으로 어류와 같은 수중생물에 있어서 유영자세각에 대하여 평균한 평균TS는 생물의 단면적을 의미하는 체장의 제곱과의 상관관계에 대한 일반식을 도출하여 사용하고 있다. 그러나, Wiebe et al. (1990)은 기하학적 산란영역에서의 TS와 체장사이의 관계는 $30\log L$ 의 관계를 가진다고 보고 하였으며, Demer and Martin (1995)은 동물플랑크톤 TS의 단면적 및 체적에 대한 의존성은 생물의 유영자세각 변동에 따라 크게 영향을 받을 것이라고 보고 하였다. 본 연구에서는 소형의 동물플랑크톤의 유영자세각 평균 TS를 $20\log L$ 과 $30\log L$ 을 기준으로 하여 관계식을 도출한 결과, 200 kHz와 420 kHz 모두 체적 의존성이 높게 나타났으며, 그 관계는 다음의 식으로 나타났다 (Fig. 6).

$$\langle TS_{200\text{ kHz}} \rangle = 30\log L - 118.4 \quad (R^2 = 0.716) \quad (4)$$

$$\langle TS_{420\text{ kHz}} \rangle = 30\log L - 108.8 \quad (R^2 = 0.758) \quad (5)$$

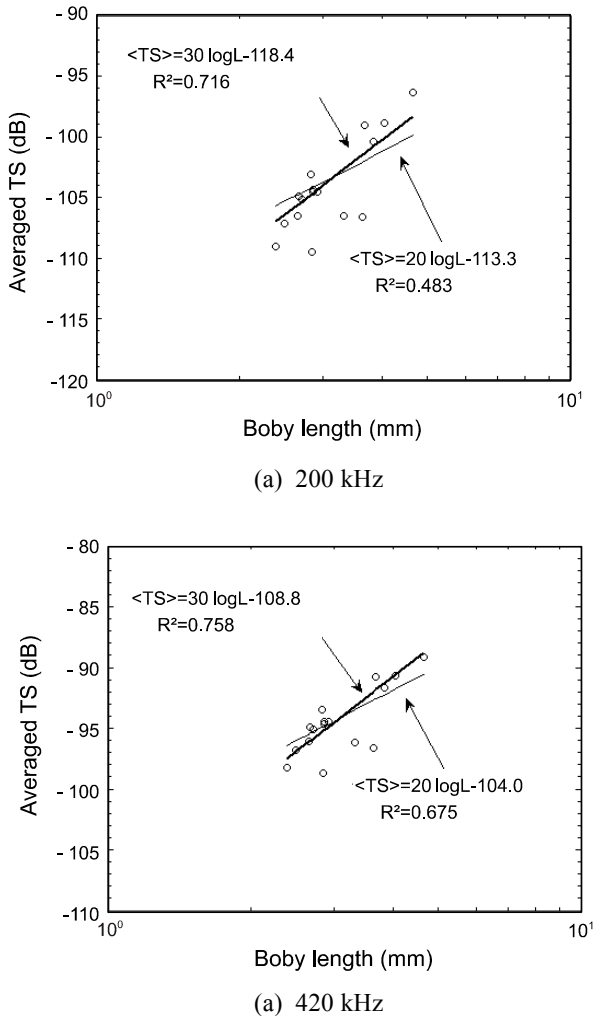


Fig. 6. Regressions between averaged TS and body length of copepods at 200 kHz and 420 kHz.

TPS모델은 동물플랑크톤을 유체구로 근사한 엄밀 모델로서, 밀도비, 음속비, 개체의 크기를 나타내는 등가구반경 만으로 다양한 추정이 가능하기 때문에 동물플랑크톤의 TS값을 쉽게 추정하여 적용할 수 있는 이점이 있으나, 체형을 구형으로 근사하기 때문에 고주파 시스템에는 적절하지 못한 것으로 인식되어 왔다. 그러나, 본 연구에서는 200 kHz와 420 kHz의 고주파수를 이용한 동물플랑크톤의 생물량 추정에서 고주파 모델인 DWBA모델뿐만 아니라, 엄밀모델인 LPS모델 TPS모델을 이용하여 TS를 추정하여도 모두 유사한 값을 나타내었기 때문에, 과학어군탐지기를 이용한 동물플랑크톤의 생물량 조사시 TPS모델을 적용하여도 높은 정확도로 생물량 추정이 가능하다는 것을 확인하였다.

요각류의 TS는 LPS모델의 a를 고정하고 a/b비를 변경하면서 추정된 결과에 나타낸 바와 같이, aspect비에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다 (Fig. 7). 또한, 이 aspect비를 이용하여 ESR을 추정된 결과, 추정된 TS값들은 거의 동일한 값을 나타내었다. 요각류의 aspect비는 해역에 서식하는 종들과 성장단계에 따라 차이가 생길 것으로 판단되므로, 음향조사시 그 해역에 서식하는 요각류를 채집하여 aspect비 및 ESR과 체장의 관계를 새롭게 추정해야 정확도 높은 생물량 추정이 가능할 것으로 판단된다.

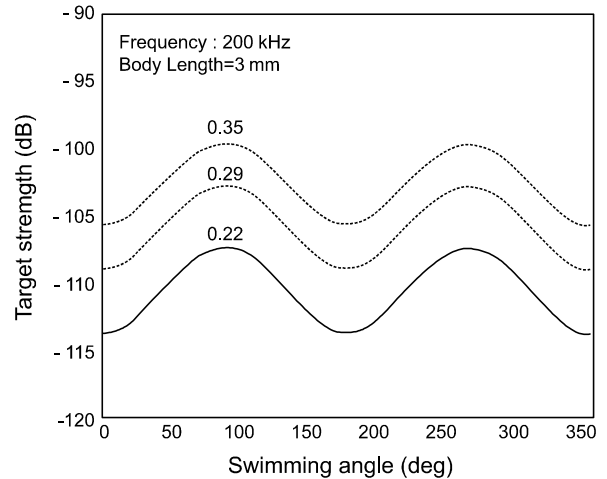


Fig. 7. Change of TS patterns by aspect ratio estimated by Liquid Prolate Spheroid model.

본 연구에서는 체장 5 mm 이하의 소형의 요각류의 TS에 대하여 검토하였는데, 이 체장 범위와 과학어군탐지기 주파수 사이의 L/λ 의 관계는 1 또는 1이하의 레일리 산란영역과 중간 영역에 걸쳐 있다. 그러나, MHz 대역의 고주파수를 사용할 경우에는 음향산란은 기하학적 산란영역에 해당되므로 음향산란특성은 플랑크톤의 체장에 따라 매우 복잡하게 나타날 것이며, 체형에 따른 산란패턴도 더욱 복잡해 질 것이다. 따라서, MHz 대역을 가지는 고주파 플랑크톤 음향시스템에 대해서는 개체의 체형에 따른 산란지향성의 영향은 더욱 커질 것으로 예상되며, 이러한 영향에 대한 검토는 새롭게 이루어져야 하기 때문에, L/λ 가 1보다 큰 기하학적 산란영역에서는

새로운 회귀관계를 유도하는 것이 필요하다.

참고문헌

- Anderson VC. 1950. Sound scattering from a fluid sphere. *J Acoust Soc Am* 22, 426-31.
- Benfield MC, Davis CS and Gallager SM. 2000. Estimating the in-situ orientation of *Calanus finmarchicus* on Georges bank using the video plankton recorder. *Plankton Biol Ecol* 47, 69-72.
- Davis CS, Gallager SM, Berman MS, Haury LR and Strickler JR. 1992a. The video plankton recorder (VPR): design and initial results. *Arch Hydrobiol Beih* 36, 67-81.
- Davis CS, Gallager SM and Solow AR. 1992b. Microaggregations of the oceanic plankton observed by towed video microscopy. *Science* 257, 230-232.
- Furusawa M. 1988. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *J Acoust Soc Jpn* 9, 13-23.
- Furusawa M, Miyanozana Y, Arijji M and Sawada K. 1994. Prediction of krill target strength by liquid prolate-spheroid model. *Fisheries Science* 60, 261-265.
- Greenlaw CF and Johnson RK. 1982. Physical and Acoustical Properties of zooplankton. *J Acous Soc Am* 72, 1706-1710.
- Herman AW, Beanlands B and Phillips EF. 2004. The next generation of Optical Plankton Counter: the Laser-OPC. *J Plankton Res* 26, 1135-1145.
- Holliday DV. 1992. Zooplankton acoustics. In : *Oceanography of the Indian Ocean*. Desai BN, ed. Oxford-IBH, New Delhi, India, 733-740.
- Hwang BK. 2008. Zooplankton biomass and size estimation using a multi-frequency acoustic system. *J Kor Soc Fish Tech* 41, 37-45.
- Johnson RK. 1977. Sound scattering from a fluid sphere re-visited. *J Acoust Soc Am* 61, 375-377.
- Kim SA and Knag SK. 1999. Recent Development in the Concept and Research Direction for Carrying Capacity of Marine Ecosystem. *J Korea Soc Fish Res* 2, 101-110.
- Lavery AC, Wiebe PH, Stanton TK, Lawson GL, Benfield MC and Copley N. 2007. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. *J Acoust Soc Am* 122, 3304-3326.
- McGehee DE, O'Driscoll RL and Traykovski LVM. 1998. Effects of orientation on acoustic scattering from antarctic krill at 120kHz. *Deep-Sea Res* 45, 1273-1294.
- Oomori M and Ikeda T. 1976. Methods of zooplankton ecology. Kyoritsu shuppan, Tokyo, Japan, 16-22.
- Pieper, RE and Holliday DV. 1984. Acoustic measurement of zooplankton distribution in the sea. *J Cons int Explor Mer* 41, 226-238.
- Stanton TK and Chu D. 2000. Review and recommendations for the modeling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J Mar Sci* 57, 793-807.
- Wiebe PH, Greene CH, Stanton TK and Burzynski J 1990. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: Emprical studies with a dual-beam acoustical system. *J Acoust Soc Am* 88, 2346-2360.

2010년 6월 4일 접수
 2010년 8월 10일 수정
 2010년 8월 16일 수리