수중 능동표적에 대한 시간분산 하이라이트 합성모델 성능분석

A Performance Analysis on the Time Spread Highlight Synthesized Models for Underwater Active Target

김 부 일* 이 형 욱* 박 명 호*
Boo-Il Kim Hyeong-Uk Lee Myung-Ho Park

ABSTRACT

An echo signal in the active sonar using a high frequency is mainly formed of a specular reflection from the surface of an object along with several equivalent scatter inside, which are characterized by the spatial distribution of the highlights on the object. This thesis proposed a model in which the synthesized echo signal can be expressed as a distributed simulated target. The proposed model is obtained after composing a signal based on the movement of highlights relative to the aspect angle from the discontinuous point of an external hull with a strong reflection from a spheroid underwater target. Because the proposed algorithm includes a synthesis of the signals related to the highlight spacial distribution, it can be applied to all kinds of systems used at a short range, and similar results were obtained to the actual measured results of all reflected signals in previous literature referring to the irregular factor application of an envelope.

주요기술용어 : Active Sonar(능동소나), Time Spread(시간분산), Highlight(하이라이트), Target Strength (표적강도), Discontinuous Point(불연속점)

1. 머리말

능동소나 및 대항체계를 연구, 개발하는 사람에게는 수중물체에 대한 반사신호를 예측하고 재현하는 분야가 매우 중요하다. 실제 수중표적은 매우 복잡한 형상을 가지고 있고, 현실적으로 많은 해상시험 및 신호획득의 어려움과 비용 등의 이유로 선진외국에서의 활발한 연구에도 불구하고 실질적인 연구자료는 거의 발표되지 않고 있다. 일반적으로 수중에서 관심의 대상인 잠수함은 매우 복잡한 내부 구조와 형상을 가지고 있다[1]. 따라서 산란이론에 근거하여 잠수함 각 반사부위의 수학적 모델링으로 입사신호에 대한 반사신호의 강도 비인 표적강도를 입사각도별로 정확하게 예측하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다[2].

고주파를 주로 사용하는 능동소나 반사신호는 물체 표면의 거울면 반사와 내부의 여러 등가적인 반사자

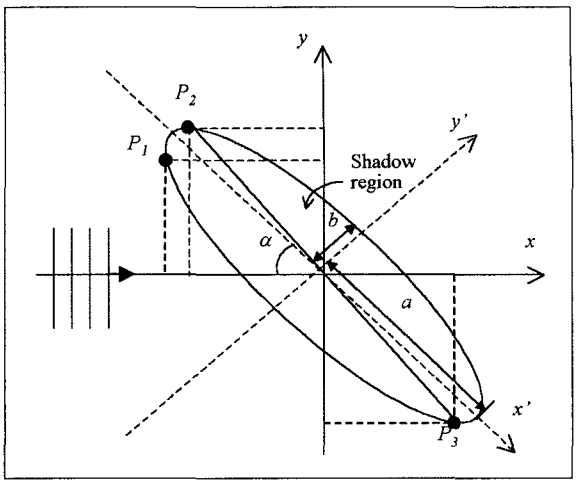
* 국방과학연구소 제2체계개발본부

로 형성되며, 이러한 반사자들은 물체에 공간적으로 분포된 하이라이트로 특징되어 진다[2,3]. 현대에서 사용하는 대부분의 능동소나 시스템 사용영역은 임계 매개변수 값이 1보다 매우 큰 물리광학 영역 또는 기하광학 영역에 속한다. 이 영역의 반사신호는 대부분 물체에서의 반사에 의해 에너지가 형성되므로, 하이라이트에 의한 반사신호 표현이 가능하다[4,5].

본 논문에서는 외부헐 불연속점에 시간분산 하이라이트들의 분포를 이용하여 능동소나 모의 표적기에 적용이 가능한 수중표적의 반사신호를 합성하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 입사각에 따라 변화하는 잠수함 외부헐의 불연속점들을 수식적으로 유도하여 하이라이트를 설정한다. 최초 반사면에서는 입사각도에 따라 그 형상이 변화하므로 유도한 하이라이트 위치에서 불연속 직교면적에 따른 가중함수를 도입한다. 그리고 각도에 따른 가중값을 다르게 적용하여 입사각도에 따라 변하는 거울면 반사효과를 나타낼 수 있다. 설정된 하이라이트들은 각 위치에 따른 분산된 거리를 계산하고, 입사각도에 따른 지연시간을 계산하여 합성한다. 이렇게 합성된 반사신호는 거울면 반사효과, 입사각도에 따른 포락선 구조의 변화, 시간분산 손실에 의한 표적강도 변화 및 신장효과 등의 수중표적에 대한 중요한 반사특성을 나타낼 수 있다.

2. 하이라이트 위치 설정 및 반사 지연시간 계산

음파가 회전타원체 물체에 입사되면 물체의 최초 접촉면에서 반사가 일어나며 음영구역이 발생되는 부분에서도 음파를 반사하게 된다. 수중표적을 회전 타원체로 고려할 때, 임의의 입사각 α로 음파가 입사되는 경우에 발생되는 불연속점 P_1, P_2, P_3의 위치는



[그림 1] 외부헐 불연속점에 의한 하이라이트 위치

그림 1에서와 같다.

평면파가 물체에 인가되면 물체의 유효 반사 직교면적은 최초 접촉지점 P_1에서부터 점차 증가하게 되고, P_2 지점에서 음파가 도달하지 않는 음영구역이 발생하기 시작한다.

그리고 음파가 P_3지점에 도달되면 그 다음부터는 모두가 음영구역에 해당되고 이 지점 또한 불연속점을 형성하게 된다. 외부헐에 위치한 하이라이트 h_{11}, h_{12}, h_{13}의 좌표는 다음과 같다.

$$h_{11}:$$

$$\left(-\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha},\ \frac{(a^2-b^2)\cos\alpha\sin\alpha}{\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}}\right)$$

$$h_{12}:$$

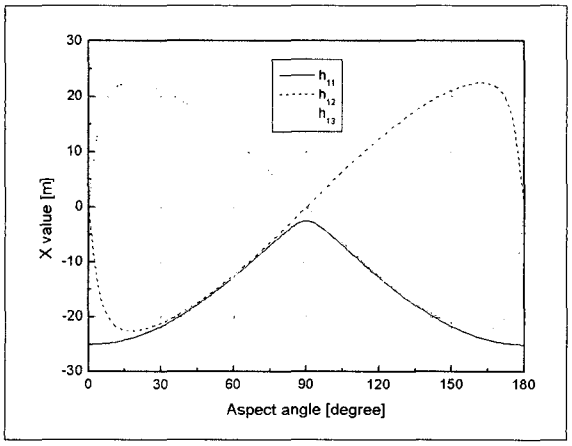
$$\left(-\frac{(a^2-b^2)\cos\alpha\sin\alpha}{\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}},\ \sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}\right)$$

$$h_{13}:$$

$$\left(\frac{(a^2-b^2)\cos\alpha\sin\alpha}{\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}},\ -\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}\right) \quad (1)$$

수중표적의 크기가 L50 × D5m인 회전타원체인 경우, 외부헐에 발생되는 하이라이트들의 입사신호의 방향에서 바라본 x좌표축의 위치는 그림 2에서와 같다. 최초 반사면에서의 하이라이트인 h_{11}과 불연속 직교면에서 발생하는 하이라이트 h_{12}는 선수에서 입사되는 경우에는 표적의 장축 절반에 해당하는 위치로 떨어져 설정이 되나, 입사각도가 증가함에 따라 20° 부근부터는 h_{11}과 h_{12}는 비슷한 위치에 설정되고, h_{13}는 멀리 떨어지게 된다. 또한 직각방향으로 입사되는 경우에는 외부 헐 하이라이트들은 가장 가깝게 위치를 하게 된다. 따라서 하이라이트 h_{11}, h_{12}, h_{13}는 모두 반사신호 강도에 직접적으로 기여를 하게 되고, 합성된 반사신호는 크게 나타난다.

실제 잠수함 표적 내부에서는 복잡한 구조물과 여러 가지 형상특성으로 미소한 산란자들에 의한 반사가 일어나며, 이러한 산란자들을 표적의 크기에 따라 내부에 하이라이트 h_{2k}를 위치시켜 신호의 연속성을 유지한 후, 각 하이라이트에 위치 변화를 주면 산란자 변이에 의한 불규칙을 띤 동요현상을 표현할 수 있다. 내부 하이라이트는 대상표적이 선정되면 크기에 따라



[그림 2] 입사각에 따른 외부헐 하이라이트의 위치

간격과 수가 결정되며, 각 내부 하이라이트들의 입사신호 방향인 x, y축으로의 좌표는

$$h_{2k}:\quad \left(\frac{0.9a(2k-N-1)}{N-1}\cos\alpha, \frac{0.9a(2k-N-1)}{(N-1)}\sin\alpha\right) \quad (2)$$

와 같이 결정되어 진다.

외부헐 반사자를 표현하는 하이라이트의 지연시간은 입사신호의 진행방향으로 볼 때, 최초면에 이동 위치한 하이라이트에서 반사를 시작한 시간을 기준으로 다음 불연속점에 발생한 하이라이트의 왕복 시간으로 반사 지연시간을 계산할 수 있다.

$$\tau_{11}=0$$

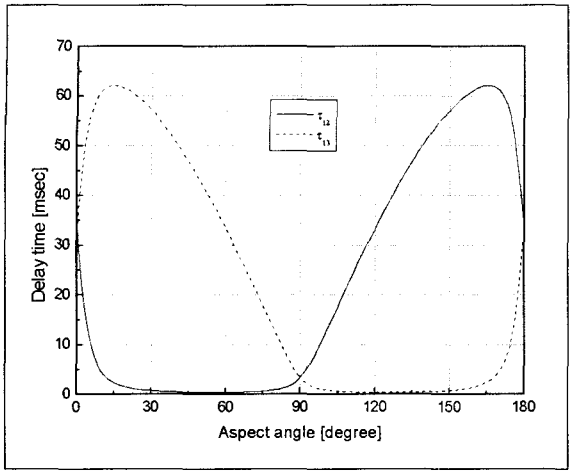
$$\tau_{12}=\frac{2}{c}\left(\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}-\frac{(a^2-b^2)\cos\alpha\sin\alpha}{\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}}\right)$$

$$\tau_{13}=\frac{2}{c}\left(\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}+\frac{(a^2-b^2)\cos\alpha\sin\alpha}{\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}}\right) \quad (3)$$

첫번째 하이라이트는 지연시간이 없으며, 두번째 하이라이트는 그림 3에서와 같이 입사각에 따라 급속히 지연시간이 짧아지게 된다. 이는 최초면 하이라이트와의 거리가 가까워져서 강도에 영향을 미치게 되며, 헐과 직각으로 입사될 때에는 두 번째, 세 번째 하이라이트의 지연시간이 짧아지므로 거울면 반사효과에 직접적으로 기여를 하게 된다.

내부에 위치한 하이라이트들의 지연시간은 일직선 배열에 의한 하이라이트 수에 의해 결정되므로

$$\tau_{2k}=\frac{2}{c}\left(\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}+\frac{0.9a(2k-N-1)}{N-1}\cos\alpha\right) \quad (4)$$



[그림 3] 입사각에 따른 외부헐 하이라이트의 지연시간

와 같다. 선수와 선미부근에서는 하이라이트들의 넓은 분포로 인하여 반사신호의 연속성을 유지할 수 있으며, 표적강도에는 영향을 미치지 못하게 된다. 하지만 헐에 직각으로 입사될수록 내부 하이라이트들의 지연시간이 급속도로 짧아지게 되어 유효한 하이라이트들은 표적강도에 기여를 하게 된다.

전망탑과 프로펠러, 꼬리 및 수평날개에 위치한 특정 하이라이트는 대상 표적마다 다르게 설정되며, 위치에 따른 지연시간은 다음과 같다.

$$\tau_{3k}=\frac{2}{c}\left(\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}+x_k'\cos\alpha+y_k'\sin\alpha\right) \tag{5}$$

3. 입사각 변화에 따른 신호합성

수중표적을 근거리에서 사용이 가능한 다중 하이라이트 시스템으로 고려하면, 표적 전체의 하이라이트에 대한 반사신호는 각각 하이라이트의 전체 합으로 표현된다[4].

$$p_b(t)=\sum_{k=1}^{N} h_{t_k}(r_k,t)*p_i(t) \tag{6}$$

일반적으로 수중표적은 입사파에 대해 기울어져 위치하고, 각 하이라이트는 입사각이 고려된 시간 지연 후 반사신호를 만들어 낸다. 실제로 해상실험을 해보면 각 하이라이트마다 반사 정도가 다르게 나타나며, 이는 각 물질적 특성 및 형상에 따라 다르므로 하이라이트 모델에서는 가중함수로써 해결하며, 지연시간이 고려된 전체 하이라이트의 응답함수 h_T는

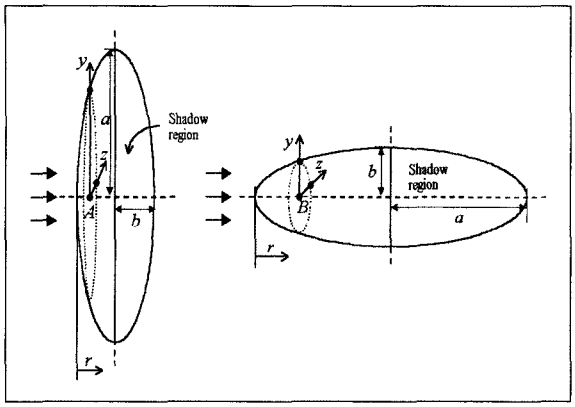
$$h_T(t)=\sum_{k=1}^{N} w_k h_{T_k}(t-\tau_k) \tag{7}$$

로 표시된다. 여기서, w_k는 k번째 하이라이트의 가중함수이고, τ_k는 k번째 하이라이트의 지연시간 함수로서 시간 분산된 각 하이라이트의 거리 L_k와 입사각 α에 의해 결정되는 값이다. 전체 하이라이트에 의한 응답함수는 외부헐과 내부 산란자 및 특정지점에의 하이라이트 합으로 표현할 수 있다.

$$h_T=\sum_{l=1}^{N_l} h_{T_l}+\sum_{m=1}^{N_m} h_{T_m}+\sum_{n=1}^{N_n} h_{T_n} \tag{8}$$

따라서 전체 하이라이트는 분포를 이루게 되고, 각 하이라이트에 의한 응답함수는 입사각도에 대한 분산된 값을 고려하여 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{l,m,n=1}^{N_l N_m N_n} h_{T_{l,m,n}}=\sum_{l,m,n=1}^{N_l N_m N_n} w_{l,m,n}h_{l,m,n}(t-\tau_{l,m,n}) \tag{9}$$



(a) 선폭방향 (b) 선수방향

[그림 4] 회전타원체의 직교면적

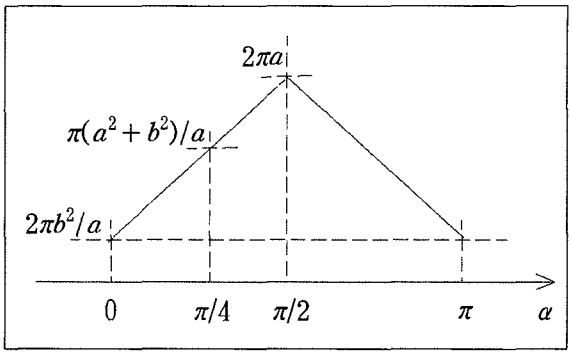
여기서, $\tau_{l,m,n}$은 하이라이트 l, m, n까지의 지연시간을 표시하며, 앞에서 구한 값들이 적용된다. $w_{l,m,n}$은 각 하이라이트에서의 가중치로 실제값과의 차이를 보정해 준다. 실제로 $w_l \mid_{l=1}$인 거울면 반사가 일어나는 지점의 가중치가 가장 크고, 입사각에 따른 변화가 큰 가중함수가 필요하다. 거울면 반사가 일어나는 최초면에서의 하이라이트 가중함수를 결정하기 위한 직교면적은 그림 4에서와 같다.

먼저 헐 및 선수방향으로 입사되는 경우의 직교면적의 불연속 크기를 구한 후, 선형적으로 결정한다. 이 경우 거리 r에 대한 A, B점에서의 직교면적은

$$A_A(r)=\frac{\pi a}{b}\{b^2-(r-b)^2\} \tag{10a}$$

$$A_B(r)=\frac{\pi b^2}{a^2}\{a^2-(r-a)^2\} \tag{10b}$$

와 같다. 거울면 반사가 우세한 외부헐 최초 반사점에서의 불연속 크기는 $r=0$인 지점에서 미분한 크기이다.



[그림 5] 입사각도별 최초 반사점에서의 불연속 크기

$$\left.\frac{dA_A(r)}{dr}\right|_{r=0}=2\pi a \tag{11a}$$

$$\left.\frac{dA_B(r)}{dr}\right|_{r=0}=\frac{2\pi b^2}{a} \tag{11b}$$

그러므로 최초면에서의 하이라이트 가중함수는 입사각에 따른 함수가 되며, 입사각 α에서의 가중함수 크기를 그림 5에서와 같이 각도별로 선형적으로 변화하는 값으로 적용하면 입사각도에 따른 거울면 반사 효과를 구현할 수 있다.

$$w_l(\alpha) \mid_{l=1}=x_l\frac{2}{a}\{2(a^2-b^2)\alpha+\pi b^2\} \tag{12}$$

여기서, x_l는 대상표적의 외부 헐에 따라 보정되는 값이다.

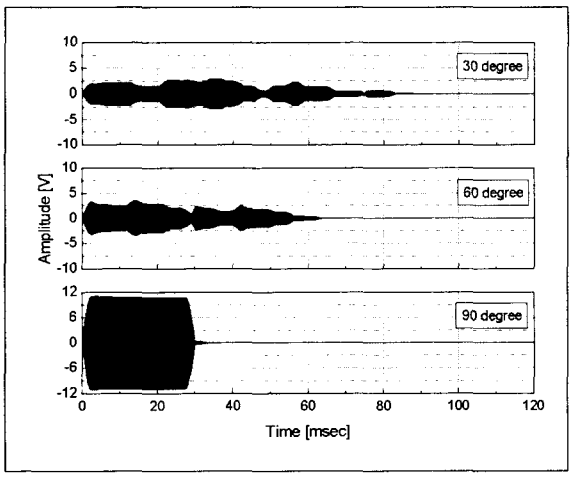
4. 시뮬레이션 및 특성 고찰

본 논문에서 제안한 능동 모의표적 반사신호 합성 모델의 성능을 분석하기 위하여 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 실험대상으로는 가상의 수중표적

으로 잠수함을 회전타원체로 모델링 하였으며, 사용된 입사신호는 주파수 50KHz, 펄스길이 30msec인 CW 정현파를 사용하였다. 실시간 시스템에 적용하기 위하여 제안된 모델은 입사 펄스주기 이내에 반사신호 합성이 가능하게 하였고, 총 14개의 하이라이트를 사용하였다. 제안된 모델은 잠수함에서 나타나는 중요한 특징을 입사각도별로 고찰하였으며, 각 모델에 대하여 조건별로 200번의 몬테카를로(Monte Carlo) 모의실험을 수행하여 평균값과 제곱근 평균 제곱 오차(RMSE)로 비교 분석하였다.

먼저 크기가 L50×D5m인 잠수함 수중표적에 대하여 입사 펄스가 표적의 선수방향에 대해 30°, 60° 및 90°로 입사되는 경우에 제안한 모델을 통해 생성된 합성 반사신호 출력은 그림 6에서와 같다.

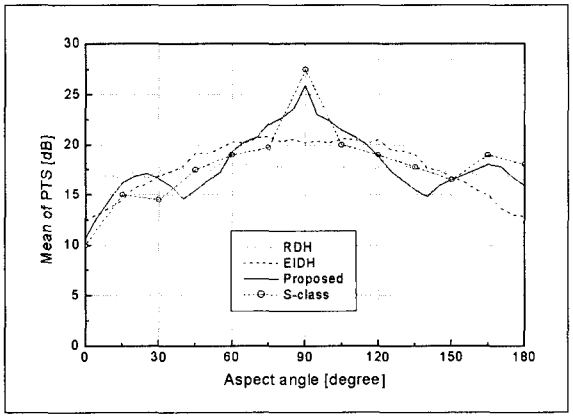
합성된 반사신호는 입사각의 변화에 따라 포락선 분포가 다르게 형성되고 크기도 다르게 나타난다. 90°로 입사되는 경우에는 신호의 강도가 크고 반사되는 신호의 길이는 짧게 나타나지만, 30°로 입사되는 경우에는 강도는 줄어드는 반면 반사되는 길이는 길어진다. 이는 입사각에 따라 하이라이트의 이동된 위치설정으로 표적에 직각으로 입사한 신호에 대해서는 헐에 의한 거울면 반사와 전망탑에 의한 반사가 크게 나타나며, 입사각이 선수와 선미로 갈수록 각 하이라이트들의 시간분산으로 반사신호에 대한 기여도가 적어지므로 합성된 신호의 강도는 작아진다. 입사각이 작을수록 내부 구조물에 의한 반사와 시간지연에 의하여 각각 하이라이트 특징이 나타나서 포락선 구조는 점점 복잡한 형상을 가지게 되며, 입사각 변화에 따라 유효 지연시간 길이의 증가로 반사신호의 길이도 변화되어 나타난다. 최초면에서의 거울면 반사 효과는 각 입사각도에서 뚜렷하게 볼 수 있다.



[그림 6] 입사각 변화에 대한 반사신호 합성 결과

입사신호의 각도별 첨두치 표적강도의 평균값을 기존의 모델과 제안된 모델에 대하여 2° 간격으로 시뮬레이션한 결과는 그림 7에서와 같다.

제안된 모델은 실제 표적에서 볼 수 있듯이 헐과 직각인 부근에서의 거울면 반사와 전망탑에 의한 큰 강도값을 잘 표현하고 있으며, 20°, 160° 부근 및 선미에서의 강도 상승효과도 특정점 하이라이트에 의해 뚜렷하게 나타난다. 또한 선수와 선미로 갈수록 하이라이트의 넓은 위치분포로 시간지연에 의한 에너지손실이 크므로 측정값과 유사하게 표적강도가 떨어지게



[그림 7] 입사각도별 첨두치 표적강도 평균값

[표 1] 입사각도별 첨두치 표적강도의 RMSE

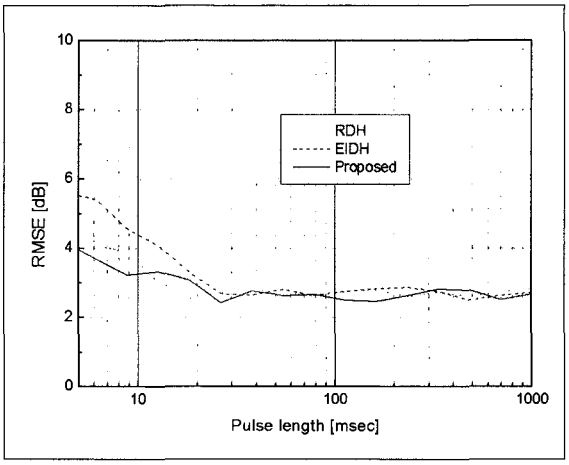
Model	Mean of RMSE, α=0° ~ 180°	RMSE			
		0°	30°	60°	90°
RDH	3.93	6.82	3.54	3.16	11.01
EIDH	3.75	3.55	3.19	3.01	8.99
Proposed	2.65	1.53	2.88	2.62	1.88

나타나는 것을 알 수 있다.

각 모델에 대한 RMSE를 비교하여 표 1에 나타내었다. 제안된 모델은 기존의 두 모델에 비하여 각도별로 가장 작은 오차값을 가지고, 특히 90°에서의 오차가 크게 줄어든다. 전 입사각에 대한 RMSE 평균값도 제안된 모델이 기존의 두 모델에 비하여 작게 나타남을 알 수 있다.

회전타원체 수중표적에 반사자들이 균일하게 분포한다고 가정한 이론적 강도변화 특성에 대하여, 펄스길이 변화에 따른 첨두치 표적강도의 RMSE 계산 결과는 그림 8에서와 같다. 입사각도가 60°인 경우를 보면, 제안된 모델과 RDH 모델의 RMSE 값이 EIDH 모델보다 작게 나타난다. 이는 제안된 모델에서는 입사각이 90°에 가까울수록 표적의 폭에 의한 영향이 나타나기 때문이다. 또한 펄스길이가 짧을수록 비교모델 모두 RMSE 값이 커지고 있으며, 이는 제한된 하이라이트 사용에 의해 짧은 펄스에 대한 각 반사자들을 적절히 표현하지 못하기 때문이다.

자체 이동 탐색형의 능동소나 시스템이 실제 사용가능한 펄스길이는 30~120msec이다. 이 범위 내에서 L70 × D7m인 두 표적에 대해 각 모델간 RMSE 평균값을 비교하여 표 2에 나타내었다. 실제 사용 범위내의 펄스길이 변화에 대해서도 전반적으로 입사각도가 작을수록 RMSE 평균값은 크게 나타나며, 각 모델의 특성은 비슷하게 나타난다.



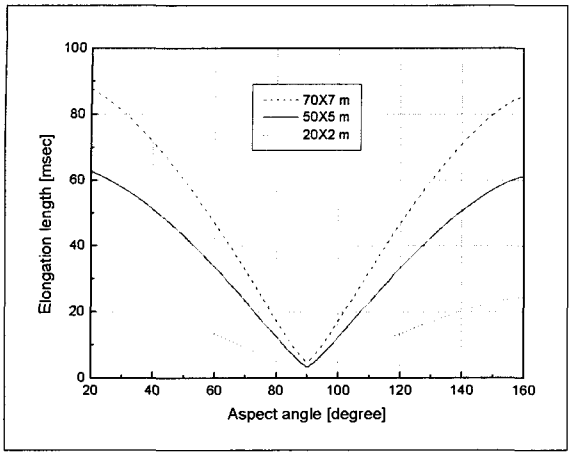
[그림 8] 펄스길이에 따른 첨두치 표적강도의 RMSE(α=60°)

[표 2] 펄스길이에 따른 평균 RMSE

Model	Mean of RMSE, τ_p=30~120msec	
	α=30°	α=60°
RDH	2.66	2.65
EIDH	3.08	2.82
Proposed	2.47	2.28

함정크기별 반사신호 신장효과를 시뮬레이션한 결과는 그림 9에서와 같다. 신호신장은 최초 하이라이트점과 유효 합성신호의 마지막 하이라이트까지의 왕복 경로차이로 발생되므로, 표적이 클수록, 입사각도가 작을수록 반사신호 신장효과는 크게 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 선폭방향으로 입사되는 경우에는 반사자까지의 왕복 경로시간이 짧아지므로 신장효과도 작게 나타난다.

각 모델에 대한 입사각도 20°~160°에서의 표적 크기별로 RMSE를 비교한 결과는 표 4에서와 같다. 표적의 크기가 클수록 제한된 하이라이트수의 사용으로



[그림 9] 함정크기에 대한 반사신호 길이 변화

[표 4] 함정크기별 합성된 반사신호 신장의 RMSE

Model	L20×D2m	L50×D5m	L70×D7m
RDH	1.681	4.219	5.981
EIDH	0.513	0.978	1.301
Proposed	0.406	0.723	0.951

오차는 증가하며, 전체적으로 제안된 모델의 반사신호 신장 오차 값이 기존의 두 모델에 비하여 작게 나타난다.

5. 맺음말

본 논문에서는 수중표적이 분포로 보이는 근거리에서도 능동소나의 모의표적기로 적용할 수 있는 외부헐의 불연속적인 시간분산 하이라이트를 이용한 반사신호 합성 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 먼저 펄스신호가 입사하는 각도에 따라 실제적으로 변하는 반사점을 수중표적인 잠수함의 외부헐에 따라 이동하는 하이라이트로 유도하여 위치 및 지연시간을 계산하고, 불연속 직교면의 미분치에 비례하는 가중함수를 적용함으로써 외부헐에서 크게 일어나는 거울면 반사효과와 입사각에 따른 강도변화 특성을 구현할 수 있었다. 이는 각 입사각도별 첨두치 표적강도의 RMSE와 함정크기별, 펄스길이별 RMSE를 기존 모델과 비교하여 그 성능을 비교, 고찰하였다. 본 연구에서 제안한 수중 모의표적의 반사신호 합성 모델은 시간분산에 의한 하이라이트 분포에 의해 반사신호를 합성하므로 근거리 표적의 입사각도 및 펄스길이에 따른 표적강도 예측모델로 사용될 수 있으며, 수중 능동 감시기 및 대항시스템 등의 실시간으로 응답하는 독립구동형 모의 표적기에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] T. Clancy, Submarine, A Guided Tour Inside a Nuclear Warship, Berkley Books, New York, 1993.

[2] Y. Jiang, H. Feng, X. Hao, and J. Hui, "A study on 2-dimensional highlight distribution of underwater target", *Acta Acustica*, Vol.22, No.1, pp.79~86, Jan. 1994.

[3] 김부일, "수중 반사신호 합성을 위한 표적강도 예측모델 비교분석", 한국군사기술학회지, 제4권 제1호, 2001. 7, pp.93~103.

[4] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, third edition, McGraw-Hill, USA, 1983.

[5] Y. Jiang, Z. Wang, X. Hao, J. Hui, and P. Cai, "Active sonar target modeling", *UDT Europe Conference Proceedings*, pp.36~37, Jun 1998.