

---

# Ship-Wake 이론을 이용한 잠수함 항적탐색 가능성

이용철\*

The Detectability of Submarine's Turbulent Wake on the sea surface using Ship-Wake Theory

Yong-chol Lee\*

---

본 연구는 2010년도 해군사관학교 해양연구소의 연구비 지원에 의하여 연구된 논문임

---

## 요 약

자유전단류(Shear free flow) 가정을 이용한 수상함 항적모델을 잠수함에 적용 결과 잠수함 난류항적 반지름은  $x^n$ , ( $\frac{1}{5} \leq n < \frac{1}{2}$ ) 에 비례하였으며, 난류항적의 최소 확산을 가정할 때( $\sigma = 50.25$ , 즉  $\propto x^{1/5}$  인 경우), 길이 65m, 폭 6.5m 속력 6kts 인 잠수함의 난류항적 반지름은 잠수함 함미로부터 1.2Km 후방에서 약 20m, 10Km 후방에서는 약 30m에 달하였고, 해수면에서 관측 가능한 잠수함 난류항적은 잔잔한 해상상태에서 잠수함 후방 약 15Km에 이르는 것으로 나타났으나 쇄파가 발생하는 악천후에서는 해수면에서 난류항적을 관측하기는 매우 제한되었다. 이는 적어도 서해와 같이 얇은 잠수함 작전환경에서는 잠수함 난류항적이 해수면에서 나타나는 것을 의미하며 SAR와 같은 탐지체계를 이용 시 탐색 가능성을 의미한다.

## ABSTRACT

The width of a submarine's turbulent wake, using Shear-free and Ship wake theory, is proportional to  $x^n$ , ( $\frac{1}{5} \leq n < \frac{1}{2}$ ) If we assume submarine's length, width, velocity are 65m, 6.5m, 6kts respectively, and the minimum diffusion of turbulent wake ;  $\propto x^{1/5}$ , the width of wake behind the submarine is about 20m at 1.2km, 30m at 15km when there is no breaking waves on the sea surface. However, in the case of breaking waves, it is very limited to identify submarine's wake on the sea surface because wind generated turbulent wake has higher turbulent kinetic energy than that of submarine's wake. As a result, there is a high possibility to detect submarine's wake on the sea surface in the shallow water such as the Yellow-Sea using a proper detection method such as SAR. This means that in anti-submarine operations, non-acoustic sea surface surveillance applied turbulent wake will be very effective way to detect a submarine in near future. To do this we have to develop exact theory of submarine's turbulent wake above all.

## 키워드

난류항적, 잠수함, 항적탐색, SAR, 해수면 광역 실시간 감시

## Key word

Turbulent wake, Submarine, wake-detection, surface surveillance, SAR

---

\* 정회원 : 해군사관학교 (zeuszeus@hanmail.net)

접수일자 : 2011. 02. 05

심사완료일자 : 2011. 02. 25

## I. 서 론

원격 감시체계를 이용한 해수면 물리현상 연구는 1980년대 중반부터 본격적으로 이루어졌다. 원격 감시체계는 해수면의 광학영상 및 레이더 또는 자외선 영상을 제공함으로써 광대역 해양 표면연구[1]를 가능하게 하였을 뿐 아니라, 해수면의 온도분포[2], 해양 표면 해류[3], 해수면상의 바람 분포[4], 해수면상의 생물 분포 연구[5]등에 지대한 공헌을 하였다. 특히 고분해능 합성 개구면 레이더(SAR : Synthetic Aperture Radar)에 의해 제공되는 해수면 레이더 영상은 수상함 항적(Ship Wake)을 식별 가능케 함으로써 항적탐색[6]-[8]이라는 새로운 학문분야를 개척하였다. SAR 영상에서 수상함 항적은 그림 1. 과 같이 밝은 주변과 대비되는 검은 흔적으로 나타나며 그 이유는 다음과 같다. 해수면에 존재하는 수 cm 크기의 수면파(short waves)들은 SAR 신호를 난반사시킴으로써 밝은 영상으로 표현된다. 이에 반해 수상함이 생성하는 난류는 해수면 표면장력을 변화시킴으로써 수면파를 소멸[7],[8]하는 역할을 함으로써 수상함 항적은 상대적으로 주변과 대비되는 검은 영상으로 나타나게 된다.

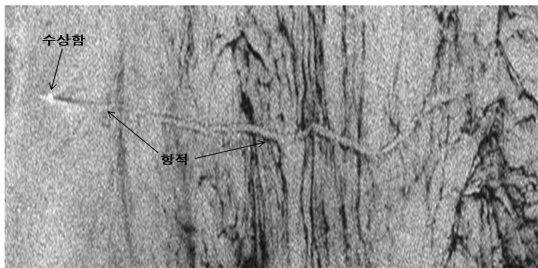


그림 1. 수상함 항적의 SAR영상 (40Km x 8Km) [9]  
Fig. 1 SAR Image of a surface ship's wake

수상함에 의해 생성된 높은 에너지의 난류(Turbulence)는 시간에 따라 보다 낮은 에너지의 소규모 난류로 분화함과 동시에 주변으로 확산됨으로써 주변 해수면과 구별되는 항적(Wake)을 형성한 후, 유체의 점성에 의해 결국 소멸한다. 따라서 수상함 항적의 크기와 지속 시간은 난류의 에너지 준위, 확산정도 그리고 소멸비에 의하여 결정되며, 탐색범위(거리 및 폭)는 난류항적 에너지에 대한 해수면 배경 난류 에너지의 상대적 크기에 의존하게 된다. 수상함 항적과 관련된 국내연구는 풍파(wind wave)에 의한 켈빈파의 변형[10], 수상함 항적

내 존재하는 기포(Bubbles)의 음향 산란을 이용한 항적탐색[11]을 들 수 있지만 수상함 난류항적이 갖고 있는 역학적 특성에 관한 연구가 아니라는 점과 음향에 기반한 항적탐색이라는 점을 고려할 때, 1990년 중반이후 관련 연구가 활발히 이루어진 여러 선진 국가와 비교 시, 난류항적(Turbulent Wake)에 대한 국내 연구는 매우 낮은 감이 있다. 특히 지난 천안함 사건과 같이 북한의 잠수함 위협 상존하고 있는 안보현실과 해양 환경에 따라 음향탐색의 신뢰도가 제한된다는 점을 고려할 때, 국내에서도 비 음향신호로서 난류항적을 이용한 해수면 광역 실시간 잠수함 탐색에 대한 연구가 무엇보다 필요하나 앞서 언급하였듯이 국내 난류항적에 대한 연구가 사실상 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 알려진 수상함 항적 모델을 잠수함에 적용함으로써 잠수함 항적의 확산 범위 및 에너지 준위를 살펴보고 이를 통해 잠수함 난류항적에 대한 개괄적인 해수면 탐색 가능성에 대하여 알아보하고자 한다.

## II. 수상함 난류항적 모델

수상함에 대한 항적모델 연구는 Hasselmann[12], Snyder[13], Milgram[8], Benilov[14] 등을 들 수 있다. 본 장에서는 Benilov의 연구방법론을 따라서 난류항적을 기술하고, 다음 장에서 잠수함에 적용함으로써 잠수함 난류항적의 해수면 분포 가능 범위에 대하여 알아보기로 한다.

난류항적은 비선형 시스템으로서 무수히 많은 자유도가 존재하기 때문에 문제해결을 위한 가정을 필요로 한다. Naudascher[15], Milgram[8] 등에 의하면, 자유전단류(Shear free) 모델은 수상함 항적을 기술함에 있어 훌륭한 가정이라 할 수 있으며 다음과 같다.

가. 수상함에 의한 난류에너지는 해수면에 존재하는 자연발생적 난류 에너지보다 충분히 높다.

나. 항적난류의 특징적 변화가 나타나는 길이를  $L$ , 난류 혼합길이(Turbulence mixing length)를  $l$ , 난류의 운동 에너지  $k$ , 자함의 이동 속력을  $U_s$ 로 놓았을 때 다음 조건을 만족한다.

$$L \gg l \frac{\sqrt{k}}{U_s}$$

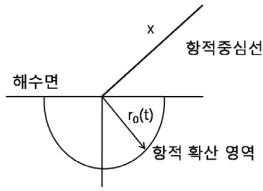


그림 2. 좌표계 설정  
Fig. 2 Coordinate System

그림 2와 같은 좌표계에서 난류에너지 에너지 방정식 [16]에 자유전단류 가정을 적용하고, Prandtl과 Taylor의 난류 혼합길이( $l$ ) 가정을 적용하면 난류에너지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \beta_1 l \sqrt{k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\beta_2}{\beta_1} \frac{k^{3/2}}{r_0(t)} \quad (1)$$

여기서,  $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j}$ : 난류 에너지,  $t \equiv \frac{x}{U_s}$ ,  $\beta_1 = \frac{1}{Pr_k}$ ,  $Pr_k$ : 난류에너지 확산에 대한 프란틀 수,  $\beta_2$ : 비례상수,  $r_0(t)$ : 난류 확산 범위,  $0 \leq \beta_l = \frac{l}{r_0(t)} \leq 1$  이다.

식(2)의 해를 가정하고 원통좌표계를 적용하면, 식(1)은 식(3)과 같이 변형된다.

$$k(r, t) = \frac{1}{(\beta_1 \beta_l)^2} B(\xi) (\dot{r}_0)^2, \quad (0 \leq \xi \equiv \frac{r}{r_0} \leq 1) \quad (2)$$

여기서,  $B(\xi)_{\xi=1} = 0$ ,  $\left( \frac{dB}{d\xi} \right)_{\xi=0} = 0$

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi B^{1/2} \frac{dB}{d\xi} \right) + \xi \frac{\partial B}{\partial \xi} + \lambda B - \sigma B^{3/2} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\sigma = \frac{\beta_2}{\beta_1 \beta_l^2}$ ,  $\lambda = -\frac{2r_0 \ddot{r}_0}{(\dot{r}_0)^2}$

식(3)의 해는 주어진  $\lambda$ 에 대해 특정한  $\sigma$  값에서만 해가 존재하는 고유치 문제로 알려져 있다. 위  $\lambda$ 의 양변에  $\dot{r}_0 r_0^n$ 를 곱하여 정리하면

$$\frac{d}{dt} (r_0^\lambda \dot{r}_0^2) = 0, \quad (\because \lambda = n = 1) \quad (4)$$

식(4)가 만족하는 보존값을 C라 하고,  $t=0$ 일 때 항적의 폭을 수상함의 폭(a)과 같다고 가정한 후 적분하면 아

래의 식을 얻는다.

$$r_0(t) = a \left( 1 + \frac{t}{t_*} \right)^{\frac{2}{\lambda+2}}, \quad (t_* \equiv \frac{2}{\lambda+2} \sqrt{\frac{a^{\lambda+2}}{C}}) \quad (5)$$

$$\dot{r}_0(t) = \frac{2}{\lambda+2} \frac{a}{t_*} \left( 1 + \frac{t}{t_*} \right)^{\frac{-\lambda}{\lambda+2}} \quad (6)$$

식(6)을 식(2)에 대입하고, 함정의 길이를  $L_s$ , 자함의 속력을  $U_s$ , 시간  $t = \frac{x}{U_s}$ 으로 표현하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$r_0 \left( \frac{x}{L_s} \right) = a \left( 1 + S_T \frac{x}{L_s} \right)^{\frac{2}{\lambda+2}} \quad (7)$$

$$k \left( \xi, \frac{x}{L_s} \right) = k(0,0) \left( 1 + S_T \frac{x}{L_s} \right)^{\frac{-2\lambda}{\lambda+2}} \frac{B(\xi)}{B(0)} \quad (8)$$

$$\left( S_T \equiv \frac{L_s}{U_s t_*} = \frac{\lambda+2}{2} \frac{L_s}{U_s} \frac{\beta_1 \beta_l}{a} \sqrt{\frac{k(0,0)}{B(0)}} \right)$$

식(7)은 수상함으로부터 임의의 거리  $x$ 인 곳에서의 항적의 확산범위를, 식(8)은 임의의 위치에서의 항적 난류 에너지를 의미하나 정확한 값을 예측하기 위해선 식(7), (8)에 포함된 각종 상수들의 값은 물론  $B(\xi)$ 의 함수형태를 알아야 한다.

### III. 잠수함 난류항적의 탐색 가능성

잠수함 항적난류를 기술하기 위하여 위에서 얻은 결과를 직접 적용할 수는 없다. 하지만 현재까지 잠수함 난류항적을 기술할 수 있는 어떠한 이론적, 실험적 결과도 문헌상 존재하지 않으며 수상함 항적의 2차원 분포 요인이 에너지 확산이란 점을 고려할 때, 수중에서 발생하는 잠수함 난류항적 역시 같은 메커니즘을 따를 것으로 예상된다. 따라서 식(3), (7), (8)을 잠수함에 적용하기에는 별 무리가 없으나 잠수함 항적의 확산을 기술하는  $\lambda$ 와 이에 대응하는 고유값(Eigen value)  $\sigma$ 을 찾아야 한다.

#### 3.1. 잠수함 난류항적 탐지 범위 예측

Hoffman[17]에 의하면  $\sigma$ 를 구성하는 상수 중  $\beta_1, \beta_2$ 의 가장 일반적인 값은  $\beta_1 \approx 1, \beta_2 \approx 0.09$ 이다.  $\beta_l$ 은 난류 혼합길이 대 항적폭(Width of turbulent wake) 비율로

서 실제 측정을 통하여 찾아야하는 값이나, 앞에서 언급하였듯이 잠수함 관련 자료 부재로 인해 아래의 방법으로 잠수함 항적 범위에 대하여 예측하여 보고자 한다.

가. 난류 운동에너지 분포함수  $B(\xi)$ 의 범위  
 잠수함 난류항적의 최대 확산을 가정하기 위해 식(3)에서 마지막 항을 무시( $\sigma \cong 0$ )하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi B^{1/2} \frac{dB}{d\xi} \right) + \xi \frac{\partial B}{\partial \xi} + \lambda B = 0 \quad (9)$$

식(2)의 경계조건을 만족하는 식(9)의 해(그림 3 참조)는 Matlab을 이용 계산하였으며,  $\lambda = 2$ 인 경우에만 해가 존재하였다. 이 경우  $B(\xi)_{\max} = 0.0625$ 이다. 여기에 난류에너지 최소 소멸을 가정을 위한  $\sigma_{\min} = 0.09$  (즉  $\beta_l = 1$ )의 값을 곱할 경우  $\sigma_{\min} B_{\max} \sim 10^{-3} \ll 1$ 로서 가정  $\sigma \cong 0$  과 크게 다르지 않음을 알 수 있다.  $\lambda = 2$ 를 식(7)과 (8)에 대입하면 잠수함 항적의 폭은  $r_0(x) \propto x^{1/2}$  이고 난류항적에너지는  $k(x) \propto x^{-1}$ 의 비례관계를 갖는다.

식(3)의 마지막 항을 무시할 수 없는 경우 문제 해결을 위하여 수상함의 측정치를 사용하기로 한다. Milgram 등이 1987년 여러 수상함에 대하여 자함으로부터 거리  $x$ 인 곳에서 항적 폭은 해수면에서 약  $x^{(1/5)}$ 의 크기로 커지는 것을 발견하였다. 이 결과는 Tennekes, Lumley[18], Zilman[19] 등의 결과와 일치한다. 이 측정값을 식(7)에 적용하면  $\lambda = 8$ 이며 이 경우  $\sigma = 50.28$ 을 만족할 때 Matlab을 이용 방정식의 해가 존재함을 알 수 있었으나, 계산 목적을 위하여 실제 함수형태와 근접한 해석해 (Analytic Solution)를 그림 3에 나타내었다. Hoffman의 가정을 사용할 때  $\beta_l = 0.0423$ 이다. 해수면에서의 수상함 항적의 수평 확산은 해수면과, 바람, 해류 등의 영향으로 수중에서의 확산과 비교 시 여러 가지 제약이 있을 것으로 예상된다. 즉  $\sigma = 50.28$ 인 경우 수상함 난류항적의  $B(\xi)$ 는 잠수함 난류항적 분포의 최소값으로 생각할 수 있다. 따라서 잠수함에 대한  $B(\xi)$  범위는 다음과 같은 범위 내에 위치할 것으로 예상된다.

$$0.02202(1 - \xi^{2.95})^2 \leq B(\xi) < 0.25^2(1 - \xi^2)^2 \quad (10)$$

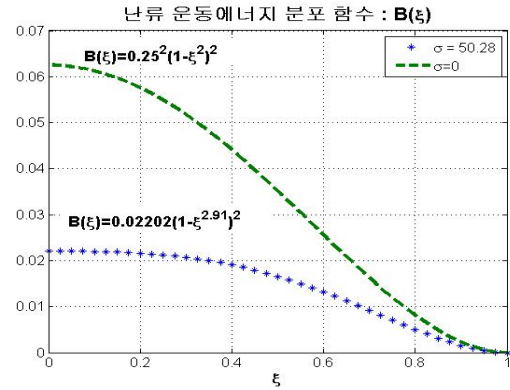


그림 3. 난류 운동에너지 분포함수의 범위  
 Fig. 3. The range of Kinetic Energy distribution function

나. 잠수함 난류항적의 확산 범위

식(7), (8), (10)을 이용하여 잠수함 항적난류의 확산 범위를 예측하기 위해선 잠수함 함미에서 발생하는 난류 에너지  $k(0,0)$ 에 대한 값을 알아야 한다. 잠수함 함미에서 발생하는 난류는 스크류의 회전에 의해 발생하는 거대 와류이나, 함 추진의 특성상 함미 방향의 속도 (즉  $x$  방향)에 비하여 횡 방향( $r$  방향) 속도는 매우 작을 것이며, 자유전단류 모델 적용시 함미에서의 난류 평균 유속은 잠수함의 이동속도에 비례할 것이라 예상할 수 있다.

$$k(0,0) \cong C_s U_s^2 \quad (C_s: \text{비례상수}) \quad (11)$$

길이  $L = 65m$ , 폭  $a = 6.5m$ , 인 잠수함이 속도  $U_s = 6Kts$ 로 잠항한다고 가정하고, 문제의 간단성을 위해 식(11)에서의 비례상수  $C_s = 1$ 로 놓으면 식(7)에 의한 잠수함 난류항적의 반지름(확산 범위)는 그림 4와 같다. 수상함 난류항적의 SAR 영상에 나타나는 V자 형태의 밝은 띠는 난류항적의 중심선을 기준으로 좌/우 각각  $\theta = 2^\circ \sim 8^\circ$ 로 분포한다[20]. 이 내용을 그림 4의 두 직선(점선, 실선)으로 표현하였으며, 함미 2700m (잠수함 길이의 약 40배) 후방에서  $\sigma = 0, \sigma = 50.28$ 인 두 경우 모두 V-자 밝은 색 무늬의 범위 내에 존재함을 볼 수 있다. 이는 식(1)이 충분히 발달된 난류에 대하여 성립되는 식임을 고려할 때, 그림 4의  $\sigma = 0, \sigma = 50.28$ 의 두 경우 모두 충분히 발달된 난류항적에 대한 최대( $\sigma = 0$ )

및 최소( $\sigma = 50.28$ ) 확산 가능 범위를 적절히 기술한다고 할 수 있다.

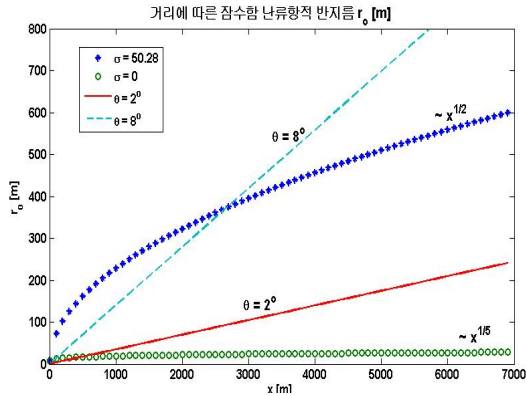


그림 4. 잠수함 난류항적 반지름(확산 범위)  
Fig. 4 Radius of Submarine's Turbulent Wake

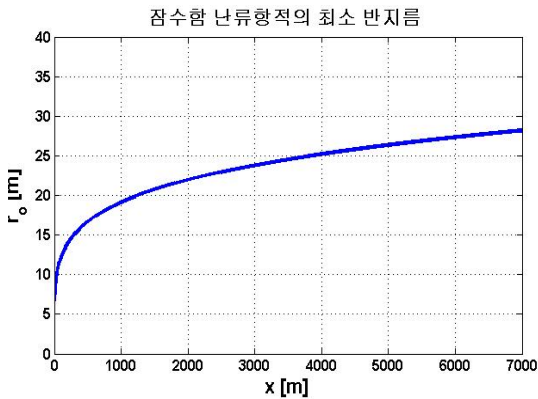


그림 5. 잠수함 난류항적 최소 반지름( $\sigma=50.28$ )  
Fig. 5 Radius of Submarine's Turbulent Wake( $\sigma = 50.28$ )

그림 5는  $\sigma = 50.28$  즉 잠수함 난류항적의 최소 확산 경우로써 잠수함 후방 약 3Km 지점에서 난류항적 반지름이 약 25m임을 보이고 있다. 이는 평균수심이 약 50m인 서해의 경우 속도 6kts, 수심 25m 깊이로 잠항하는 잠수함에 의해 생성된 난류항적이 약 16분 후 수면위로 부상함을 의미한다.

### 3.2. 난류항적의 해수면 탐지 가능성

해수면에는 공기로부터의 모멘텀 전달에 의한 배경 난류 에너지(Background Turbulent Kinetic Energy)가 존재한다. 따라서 잠수함 난류항적이 수면으로 부상할 때,

이 신호가 탐지되기 위해서는 반드시 해수면의 배경 난류에너지보다 커야 한다. 수중에서 주행하는 잠수함 난류항적의 운동에너지를  $k_s$  해수면 배경 난류에너지를  $k_e$  라 하면 해수면에서 탐지 가능한 잠수함 난류에너지  $k_D$ 는 아래의 식을 만족하여야 한다.

$$k_D = k_s - k_e \geq 0 \quad (12)$$

쇄파(wave breaking)가 없는 매우 잔잔한 해상상태 및 쇄파가 발생하는 해수면의 배경 난류에너지는 식(13), 식(14)로 각각 표현된다.

$$k_e \approx u_{*w}^2 = \frac{\rho_a}{\rho_w} u_{*a}^2 = \frac{\rho_a}{\rho_w} C_u U_a^2 \approx 10^{-6} U_a^2 \quad (13)$$

$$k_e \approx \left( \sqrt{\frac{3P_{rk}}{2C_\nu}} 10^{-4} \rho_w \beta C_o^8 \right)^{2/3} \approx 2.55 \times 10^{-4} U_a^2 \quad (14)$$

$U_a$ 는 해수면 10m 지점의 평균 풍속을 의미하며, 쇄파가 없는 경우는 2.4 - 4.4m/s, 쇄파가 발생하는 경우는 11.4 - 13.8m/s의 속도를 갖는다. 따라서 식(12)는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

쇄파가 없는 잔잔한 해상상태 :

$$k_D = k(0,0) \left( 1 + S_T \frac{x}{L_s} \right)^{-1.6} \frac{B(\xi)}{0.02202} - 10^{-6} U_a^2$$

쇄파가 발생하는 경우 :

$$k_D = k(0,0) \left( 1 + S_T \frac{x}{L_s} \right)^{-1.6} \frac{B(\xi)}{0.02202} - 2.55 \times 10^{-4} U_a^2$$

해수면으로 확산되는 잠수함 난류항적의 최소 탐색 가능성에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6은 잠수함 함미로부터 거리 x 곳에서의 잠수함 항적 반지름 r 및  $k_D$ 의 값을 나타내고 있다 그림 6.(a)는 쇄파가 없는 잔잔한 해상상태로서 해수면에서 탐색 가능한 잠수함 항적의 길이는 약 15Km임을 보여 준다. 반면 그림 6 (b)와 같이 쇄파가 발생하는 경우 해수면에서의 잠수함 항적탐색은 매우 제한됨을 알 수 있다.

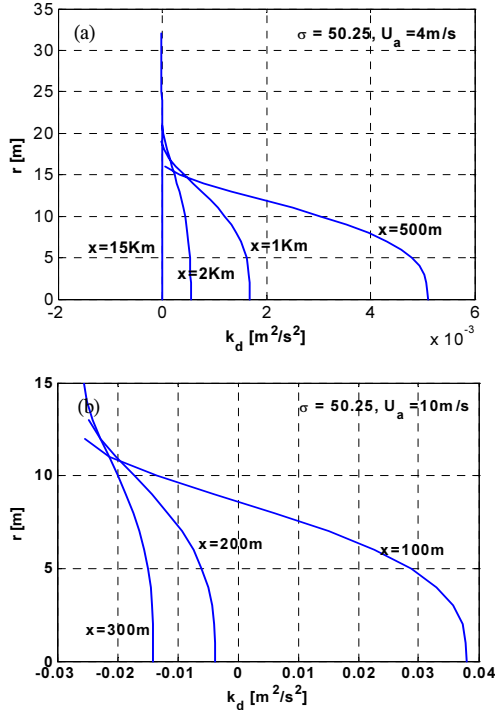


그림 6. 해수면 잠수함 난류항적 탐색 가능 범위 (a: 잔잔한 해상, b:쇄파가 발생하는 해상)  
 Fig. 6 The range of Detectability of Submarine's Wake by kinetic energy in depth.(a: without Wave Breaking, b: with Wave Breaking)

IV. 결 론

자유전단류 가정을 이용한 수상함 난류항적 모델을 잠수함 (길이 65m, 폭 6.5m, 속도 6Kts)에 준용한 결과는 다음과 같다.

가. 충분히 발달된 잠수함의 난류항적은 원통 형태로 확산되며, 자함으로부터 거리  $x$  인 곳의 항적 반지름  $r$  은  $x^n$ , ( $\frac{1}{5} \leq n < \frac{1}{2}$ )에 비례할 것으로 예측된다..

나. 잠수함 난류항적의 최소 반지름( $\sigma = 50.25$  인 경우)은 함미 1.2Km 후방에서 약 20m이며, 이후 증가하여 10Km 지점에서는 약 30m에 달하였다. 이는 잠수함 난류항적의 해수면 탐색 가능성을 보여주는 것으로

서해와 같은 천해 해양환경에서는 잠수함 탐색에 난류항적 신호를 이용할 수 있음을 시사한다.  
 다. 서해와 같은 천해에서 잠수함 활동 시 쇄파가 없는 잔잔한 해수면에서는 잠수함 후방 약 15Km 까지 수면에서 잠수함 난류항적 탐색이 가능하다. 이는 양호한 기상상황 및 천해 작전환경의 경우 해수면에서 탐색 가능한 잠수함 난류항적의 길이가 약 10Km 이상임을 의미한다. 반면 쇄파가 발생하는 악천후의 경우, 수면에서의 잠수함 항적탐색은 매우 제한적이었다.

이상의 결과는 현재의 잠수함 탐색이 음향 및 레이더를 이용한 국지적 잠수함 탐색에서, SAR와 같은 영상수단을 동원할 경우 실시간 해수면 광역탐색으로 확대될 수 있음을 의미한다. 현재의 잠수함 탐지체계가 대부분 음향에 의존하고 천안함 사건과 같이 잠수함을 이용한 북한의 도발 위협이 증가하고 있는 현실 그리고 이미 14개 국가가 SAR 체계를 개발 운용하고 있음을 고려할 때 우리나라에서도 난류항적 및 SAR를 이용한 잠수함 광역 감시체계의 개발은 필수적이며, 이를 위해 잠수함 항적난류를 정확히 기술할 수 있는 항적 모델 개발이 시급하다. 언급하였듯이 본 연구는 수상함 항적모델을 잠수함에 그대로 적용하였다는 한계를 갖고 있다. 하지만 잠수함 난류항적에 대한 개발적 이해에는 무리가 없다고 판단하며 본 논문을 계기로 국내에서도 잠수함 항적난류에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되길 희망한다.

**감사의 글**

본 연구는 2010년도 해군사관학교 해양연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

참고문헌

[ 1 ] Stewart, "Methods of Satellite Oceanography", Univ. of California Press, Berkely, 1985.  
 [ 2 ] Minnett, "The Regional Optimization of Infrared



- Measurement of Sea Surface Temperature from Space", J. Geophysical Research, Vol. 95, No. C8, pp 13497 ~ 13510, 1990.
- [ 3 ] Shemer, Maron and Markman, "Estimates of Currents in the Nearshore Ocean Region using interferometric Synthetic Aperture Radar", J. Geophysical Research, Vol. 98, No. C4 pp 7001 ~ 7010, 1993.
- [ 4 ] Kelly, Caruso, "A Modified Objective Mapping Technique for Scatterometer Wind Data", J. Geophysical Research, Vol. 95, No. C8 pp 13483 ~ 13496, 1990
- [ 5 ] Dickey T.D "Ten Emergence of Concurrent High Resolution Physical and Bio-Optical Measurement", Reviews of Geophysics, Vol.29, No.3, pp 383~413, 1991.
- [ 6 ] Lyden, Hammond, Lyzenga, Shuchman, "Synthetic Aperture Radar imaging of surface ship wakes", J. Geophysical Research, Vol. 93, No. C10, pp 12293 ~ 12303, 1988.
- [ 7 ] Milgram, Peltzer, Griffin, "Suppression of Short Sea waves in Ship Wake Measurements and Observations", J. Geophysical Research, Vol. 98, No. C4, pp 7103 ~ 7114, 1993.
- [ 8 ] Milgram, Skop, Peltzer, Griffin, "Modeling Short Wave Energy Distributions in the Far Wakes of Ships", J. Geophysical Research, Vol. 98, No. C4, pp 7115~ 7124, 1993.
- [ 9 ] <http://psc.apl.washington.edu/Harry/Pierre/SHO WEX/index.html>
- [10] Kwi-Joo Lee, I.V. Shugan, Jung-Sun An, "Kelvin ship wake modification due to wind waves", 한국 해양공학회지 제 22권 5호 pp 1 ~ 6, 2008
- [11] 지윤희, 이재훈, 김재수, 김정해, 김우식, 최상문, "항적 산란신호의 모델링과 실험적 검증", 한국 음향학회지 제 28권 제 1호 pp 10 ~ 18, 2009.
- [12] Hasselmann, "Gurndleichungen der seegangs voraussage", Schiffstechnik 7. pp 191-195, 1960
- [13] R.L.Snyder, F.W.Doboson, J.A.Elliott, R.B.Long, "Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves", J. Fluid Mech. 102, pp 1~59, 1981
- [14] A. Y. Benilov, "Ship-Wake Turbulence", Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Vol.10, pp 253~264, 1997
- [15] E. Naudascher, "low in the Wake of Self Propelled Bodies and related source of Turbulence", J. Fluid Mechanics, Vol.22 No.1, 1965
- [16] Monin, Yaglom, "Statistical Fluid Mechanics : Mechanics of Turbulence", Vol 1, 4th printing, pp 383, 1979.
- [17] K. A. Hoffman, "Computational Fluid Dynamics for Engineers", A Publication of Engineering Education System, Austin Taxes, 1989
- [18] H. Tennekes, J. L. Lumley, "A First course in Turbulence", 13th, MIT Press, 1990
- [19] G. Zilman, A. Zapolski, M. Marom, "SAR Imaging of Ship Wakes and Inverse Ship Wake Problem", IWWWFB Workshop, 2004
- [20] M. Reed, J. H. Milgram, "Ship Wakes and Their Radar Images", Annu. Rev. Fluid Mechanics. Vol. 34 pp 469 ~ 502, 2002

저자소개

**이용철(Yong-Chol Lee)**



1992년 : 해군사관학교 이학사  
 1995년 : 서울대학교 물리학과 이학사  
 2000년 : 서울대학교 물리학과 이학석사

2007년 : Stevens Institute of Tech. 해양공학과 공학박사  
 2007-현재 해군사관학교 물리학교수

※ 관심분야 : 잠수함 항적난류, Air-Sea Interaction