

## 임의 $\lambda$ 에 대한 근사해 $B(\xi)$ 를 이용한 잠수함 난류항적 특성 연구

이용철\*

### Characteristics of Submarine's Turbulent Wake using Analytical Solution of $B(\xi)$ for the given $\lambda$

Yong-Chol Lee\*

Department of Natural Science, R.O.K. Naval Academy, Changwon City, Gyungnam. 51704, Korea

#### 요 약

다양한  $\lambda$ 에 대한 근사적  $B(\xi)$ 를 이용한 잠수함 난류항적의 특성은 대략  $\xi \approx 0.6$  근처에서  $B(\xi) \approx \frac{B(\xi)_{\max}}{2}$ , 그리고  $\int_0^{\approx 0.6} B(\xi) d\xi \approx 0.85 \int_0^1 B(\xi) d\xi$  인 것으로 나타났다. 본 논문의 전제인 에너지 준 평형상태에 따라 잠수함 난류항적을 기술하는데  $4 \leq \lambda \leq 8$ 의  $\lambda$ 가 현실에 보다 부합하였으며,  $\lambda$ 는 난류항적 에너지 분포와 반지름, 최대 탐지 거리에 영향을 미치고 있고, 함의 속도는 난류항적의 모양보다는 지속시간에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 극한 경우로 만약  $7 \leq \lambda \leq 8$ 이라면 서해에서는 잠수함의 난류항적이 수면에서 관찰될 것으로 판단되나 동해에서는 snorkel을 한 잠수함의 신호를 파악하는 데 사용될 수 있다.

#### ABSTRACT

Using analytical solution of  $B(\xi)$ , I could find out the characteristics of Submarine's turbulent wake for the given various  $\lambda$ , which were unknown facts before. As the results,  $B(\xi) \approx \frac{B(\xi)_{\max}}{2}$  and  $\int_0^{\approx 0.6} B(\xi) d\xi \approx 0.85 \int_0^1 B(\xi) d\xi$  in the vicinity  $\xi \approx 0.6$ , there was some dependencies on the given  $\lambda$  though. The values of  $\lambda$ , in the range of  $4 \leq \lambda \leq 8$ , are more suitable to describe submarine's turbulent wake realistically, due to the bases on the quasi equilibrium state of turbulent wake.  $\lambda$  mainly affects on the radius and detection range of the submarine's turbulent wake on the surface, however, the speed of submarine mainly affect on the duration of the wake rather than shape. If  $7 \leq \lambda \leq 8$ , it can be expected that the turbulent wake can be seen on the surface in the West sea, however, snorkeling(or snorkeled) submarine's wake can be found easily in the East sea.

**키워드** : 잠수함 난류항적,  $B(\xi)$ ,  $\lambda$ , 난류항적 반지름, 해수면 탐색거리

**Key word** : Submarine's turbulent wake,  $B(\xi)$ ,  $\lambda$ , Radius of turbulent wake, Detection range on the surface

Received 04 April 2017, Revised 06 April 2017, Accepted 13 April 2017

\* Corresponding Author Yong-Chol Lee (zeuszeus@hanmail.net Tel:+82-55-907-5300)

Department of Natural Science, R.O.K. Naval Academy, Jinhae-Gu, Changwon City, Gyungnam. 51704, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.8.1604>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

잠수함의 난류항적을 기술하기 위한 국내의 시도는 이용철[1]의 논문이 최초로, 자유전단류 가정과 에너지 확산 개념을 이용한 Benilov[2]의 결과를 잠수함에 적용시킴으로써 이론적으로 수중에서 이동하는 잠수함의 난류항적 확산 범위(즉 난류항적의 반지름)를 예측한 바 있으며, 이 때 사용된 주요 방정식은 아래와 같다.

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

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

$$k \left( \xi, \frac{x}{L} \right) = k(0,0) \left( 1 + S_T \frac{x}{L} \right)^{\frac{-2\lambda}{\lambda+2}} \frac{B(\xi)}{B(0)} \quad (3)$$

$$S_T \equiv \frac{L_s}{U_s t_*} = \frac{\lambda+2}{2} \frac{L_x}{U_s} \frac{\beta_1 \beta_l}{a} \sqrt{\frac{k(0,0)}{B(0)}} \quad (4)$$

난류항적의 확산 범위와 관련된 식 (2)와 (3)을 풀기 위해선 난류항적의 무차원 운동에너지방정식(식 (1))의 해  $B(\xi)$ 를 구하여야 하는데, 주어진  $\lambda$ 에 대한 고유치로서의  $\sigma$  값을 알고 있어야만 가능하다. 이러한 이유로 이용철[1]의 논문에선 식 (1)의 두 가지 경우 즉 난류항적의 확산이 최대일 때와 최소일 때에 한하여 살펴보았다. 난류항적이 최대로 확산될 경우는 난류항적 내 유체 입자간 마찰을 무시하는 경우( $\sigma=0$ )로서, 이 경우 식 (1)은  $\lambda=2$ 에서만 해가 존재하였으며, 식 (2)에 따라 난류항적의 반지름이  $x^{1/2}$ 에 비례하여 증가함을 알 수 있었으나, 현실 세계에선 유체 간 마찰저항이 존재함으로 이 결과가 현실을 반영하기에는 다소 제한적이라 할 수 있다. 반면 잠수함 난류항적의 확산 최소범위는 수상함의 난류항적이  $x^{1/5}$ 에 비례한다는 Milgram [3]의 결과를 차용함으로써  $\lambda=8$ 임을 알았고 이를 식 (1)에 대입 시  $\sigma \approx 50.28$  일 때 해가 존재함을 알 수 있었다.

이상의 논의를 통해 잠수함 난류항적 반지름을 기술하기 위한  $\lambda$ 의 범위는  $2 < \lambda \leq 8$  사이에 존재한다는 것은 알 수 있지만 정확히 어떤 값이 실질적인 상황을 대변하는지는 알 수 없다. 그 뿐만 아니라 식 (1) ~ (4)에

등장하는 여러 파라미터들을 결정하기 위해선 다양한 실험(실험실 및 실제 현장에서의 실험)을 통해 그 값의 범위 또는 대표 값을 정하여야 하나, 학문적 관심, 국내 실험설비의 부재, 예산 등의 이유로 실험실 실험조차 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 현실에서 잠수함 난류항적의 특성을 조금이라도 이해하기 위해선 범위 내 임의의  $\lambda$ 에 대한 식(1)의 해를 구하여 볼 필요가 있으나, 앞서 언급하였듯이  $\lambda$ 와  $\sigma$ 는 상호 고유치 관계에 있음에 따라 범위 내 모든  $\lambda$ 에 대응하는  $\sigma$ 와 그 결과인 모든  $B(\xi)$ 를 구하기는 사실상 불가능하다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 이용철[4]은 주어진  $\lambda$ 에 대한 해석적 근사해를 찾는 방법을 제안하였으며, 그 결과는 식 (5)와 같다.

$$B(\xi) \cong B_{\max}(\lambda) \{ A_8 \xi^8 + A_6 \xi^6 + A_4 \xi^4 + A_2 \xi^2 + 1 \} \quad (5)$$

where,

$$B_{\max}(\lambda) = 0.0006\lambda^2 - 0.0124\lambda + 0.0849$$

$$A_8 = 0.0173\lambda^2 - 0.0783\lambda + 0.089$$

$$A_6 = -0.0366\lambda^2 + 0.3543\lambda - 0.5752$$

$$A_4 = 0.0191\lambda^2 - 0.4582\lambda + 1.8577$$

$$A_2 = 0.0001\lambda^2 + 0.1828\lambda - 2.3726$$

이용철[4]이 제시한 근사해(식 (5))는  $\xi \leq 0.95$ 인 영역에서 상대오차가 5%이하인 반면,  $0.95 < \xi \leq 1$ 인 영역에서는 상대오차가 높게 나타났다. 그러나 이 구간의 값들은  $\xi \leq 0.95$ 영역에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 그 값의 차이가 크게 의미가 없는, 즉 전 구간에서  $B(\xi)$ 를 매우 잘 기술하는 근사해를 얻음으로써, 임의의  $\lambda$ 에 대한 잠수함 난류항적을 근사적으로 매우 잘 기술한다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이용철[4]의 결과를 이용하여 임의의  $\lambda$ 에 대한  $B(\xi)$ 의 근사해로부터 잠수함 난류항적의 반지름과 에너지 분포함수를 기술하고, 그로부터 수면에 잠수함 난류항적이 나타나는 길이 등을 예측함으로써, 훗날 실제적 측정이 이루어질 경우를 대비하는 하나의 근거자료로 활용 하고자 한다.

## II. 잠수함 난류항적의 예측

본 장에서 기술하는 잠수함의 난류항적에 대한 특성

은 한국의 안보상황을 고려하여 SLBM이 탑재 가능한 것으로 알려진 북한의 신포급 잠수함을 전제로 한다. 신포급 잠수함의 길이와 폭은 각각  $L_s = 65.5m$ ,  $a = 6.6m$  [5]이고, 수중 항해 속도는 통상적인 잠수함 잠항 속도인 4knots, 6knots를 적용하기로 한다. 아래 식에서 사용할 좌표계와 변수는 그림 1에서 나타내었다.  $x$ 는 잠수함으로부터 수평거리,  $r_0$ 는 임의 위치  $x$ 에서 난류학적 반지름,  $r$ 은 난류학적 내 임의 위치를 나타낸다.

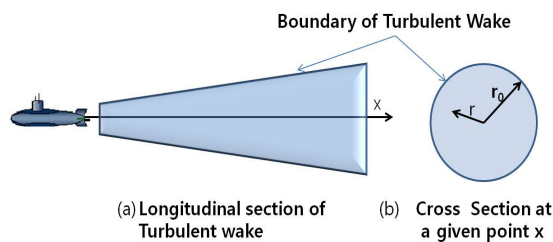


Fig. 1 Conceptual Diagram of the submarine's turbulent wake and its coordinate system.

2.1. 임의  $\lambda$ 에 대한 해석해  $B(\xi)$

$B(\xi)$ , (where  $\xi = r/r_0$ )는 난류학적의 중심, 즉 그림 1 (a)의  $x$ 축으로부터 수직 거리  $r$ 인 곳의 난류 운동에 에너지 밀도를 나타내는 무차원 함수로서  $B(\xi)$ 를 식(3)에 대입하면 종단면(그림 1 (b) 참조) 임의 위치  $r$ 인 곳에서 난류학적 내 유체입자의 운동에너지 밀도를 구할 수 있다. 식 (5)를 이용하여  $\lambda=2$ 부터 8까지 0.5씩 증가시키면서 얻은 무차원 에너지 밀도함수의 모양은 그림 2와 같다.

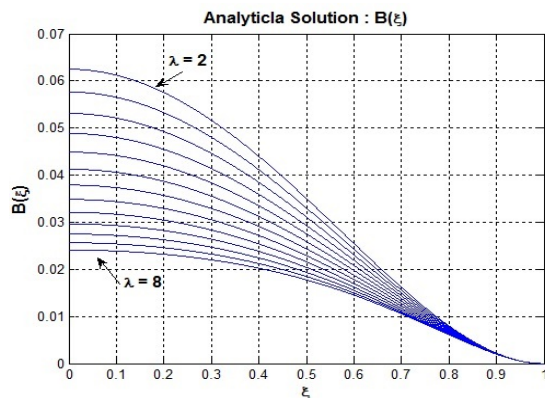


Fig. 2 Analytical Solution of  $B(\xi)$

에너지 밀도의 분포는 예상대로 난류학적의 중심인  $x$ 축, 즉  $\xi = 0$ 에서 가장 높고 주변으로 갈수록 에너지 밀도가 낮아져서 난류학적의 경계면인  $\xi = 1$ 에서 0이 됨을 보이고 있다. 이는  $\lambda$ 가 증가할수록 그에 대응하는 고유치  $\sigma$ 가 증가하기 때문이며,  $\sigma$ 는 유체의 마찰 정도를 설명하기 때문이다. 여기서 주목할 점은  $\lambda$ 가 커질수록  $B(\xi)_{max}$ 의 값이 작아지는 것에 반하여,  $B(\xi)$ 의 모양이 점점 평평하여 지고 있음을 확인할 수 있는데 이는 유체 입자간 마찰이 Kolmogorov length scale 이하에서 주로 일어난다는 것을 고려할 때,  $\lambda$ 가 커질수록 난류학적 내 난류의 특성적 길이(Characteristic length)가 점점 작아지고 있음을 보여주고 있다.

즉  $\lambda$ 가 증가할수록 최초 생성된 거대 난류가 활발한 분화를 통해 더욱 작은 크기의 난류로 분화됨으로 결과적으로 well mixed 된 난류학적을 형성하고 있음을 보여주고 있다.

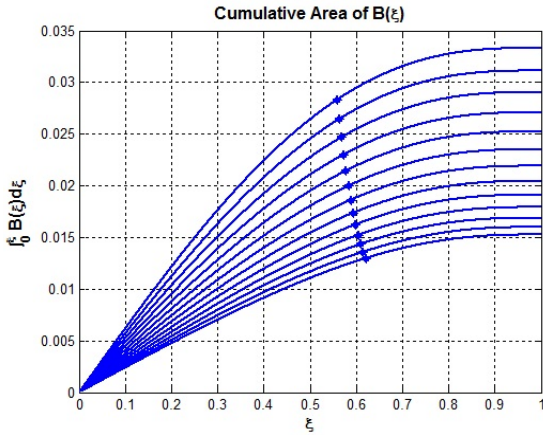
Table. 1 The positions in which  $B(\xi_{1/2}) = B_{max}/2$

$\lambda$	2	2.5	3	3.5	4	4.5
$\xi_{1/2}$	0.5407	0.5494	0.5584	0.5678	0.5775	0.5876
$\lambda$	5	5.5	6	6.5	7	7.5
$\xi_{1/2}$	0.598	0.6086	0.6196	0.6308	0.6422	0.6537

표 1은  $B(\xi)_{max}$ 가 1/2로 줄어드는 위치( $\xi_{1/2}$ )를 표시한 도표이다. 역시  $\lambda$ 가 커질수록  $\xi_{1/2}$  역시 증가하고 있으나 대체적으로  $\xi_{1/2} \approx 0.6$  근처에서 값이 1/2로 감소하고 있음을 보여준다.

주어진  $\lambda$ 에 대한  $B(\xi)$ 의 누적 적분값과 그 값의 85%에 해당하는 지점을 그림 3과 표 2에 나타내었다. 그림 3의 경우  $\lambda$ 가 증가할수록 적분값이 작아지는데  $\lambda = 2$ 인 경우에 비하여  $\lambda = 8$ 일 때는 전체 에너지가 거의 1/2로 줄어들어 있음을 볼 수 있다.

즉 유체 간 마찰에 의해 상당한 에너지가 소모되었음을 알 수 있다. 또한  $\lambda$ 가 커질수록 적분값의 크기가 작아지는 현상을 발견할 수 있는데 이는  $\lambda$ 가 8보다 큰 값을 갖더라도 에너지 밀도함수의 모양이  $\lambda = 8$ 일 경우로 근사할 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 즉  $\lambda = 8$ 이 잠수함 난류학적이 가질 수 있는 최댓값이라는 가정은 적합하다 할 수 있다.



**Fig. 3** Cumulative Area of  $B(\lambda)$   
The solid line means cumulative area of the  $B(\lambda)$  corresponding to the given  $\lambda$ . \* indicates the position where the cumulative area equals to the 85% of the total area.

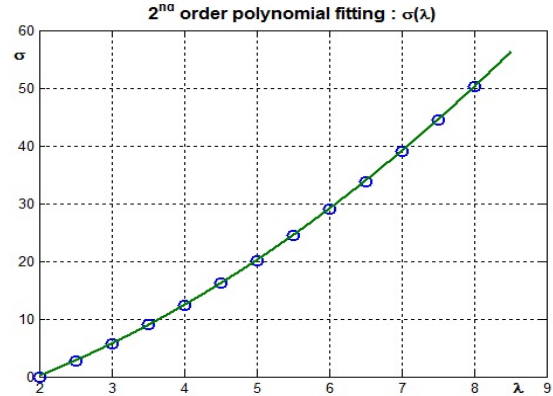
**Table. 2** The positions in which  $\int_0^{\xi} B(\xi) d\xi = 0.85 \int_0^1 B(\xi) d\xi$

$\lambda$	2	2.5	3	3.5	4	4.5
$\xi_{0.85}$	0.5407	0.5494	0.5584	0.5678	0.5775	0.5876
$\lambda$	5	5.5	6	6.5	7	7.5
$\xi_{0.85}$	0.598	0.6086	0.6196	0.6308	0.6422	0.6537

표 2는 주어진  $\lambda$ 에 대하여, 누적 적분값이 전체 적분값의 85%에 이르는 지점을 나타낸다. 표 1과 비교 시 그 값이 대체적으로 유사한데, 대략적으로  $\xi \approx 0.6$ 에서  $B(\xi) \approx B_{\max}/2$ 이고, 난류항적 종단면의 전체 에너지의 약 85%가  $\xi \leq 0.6$ 인 범위에 있다고 설명할 수 있음을 나타낸다. 앞서 언급하였듯이  $\lambda$ 가 증가할수록 유체 입자간 마찰과 관련된 고유치로서의  $\sigma$ 가 증가한다. 이로 인해  $\lambda$ 가 커질수록 전체 에너지 밀도의 누적 값이 감소하는 것은 쉽게 이해할 수 있으나, 왜  $\lambda$ 의 값에 관계없이  $\xi \approx 0.6$  근처에서  $B(\xi) \approx \frac{B(\xi)_{\max}}{2}$ , 그리고  $\int_0^{\xi \approx 0.6} B(\xi) d\xi \approx 0.85 \int_0^1 B(\xi) d\xi$ 과 같은 유사한 형태를 보이는지에 대해선 보다 정밀한 연구가 진행될 필요가 있다.

## 2.2. 임의 $\lambda$ 에 대한 $\sigma$ 및 $\beta_l$ 의 추정

잠수함에 의한 난류항적의 길이와 단면의 반지름을 예측하기 위해선 식 (4)에 있는 상수 값들 중 특히  $\beta_l$ 은 실험을 통해 결정되어야 하나, 현실적인 제약을 고려하여 근사적으로 그 값을 추정하기로 한다.



**Fig. 4** 2<sup>nd</sup> order polynomial fitting of  $\sigma$  for the given  $\lambda$ . Symbol o represents the pairs of  $(\lambda, \sigma)$  which are in relation to eigenvalues to each other. The solid line is 2<sup>nd</sup> order polynomial fitting of the data.

그림 4는 이용철[4]에서  $B(\xi)$ 의 근사해를 구하기 위해 사용한  $\lambda$ 와 대응하는 고유치  $\sigma$  값(그림 4에서 기호 'o')을 2차 함수를 이용하여 fitting한 그래프(그림 4에서 실선)로서 매우 정확히 근사할 수 있음을 알 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\sigma(\lambda) = 0.5565\lambda^2 + 2.7774\lambda - 7.6605 \quad (6)$$

잠수함 난류항적 내부의 난류에 대한 특성적 크기 (Characteristic length scale)는  $l_t = \beta_l r_0$ , ( $0 < \beta_l < 1$ ) 이고, Hoffman[6]의 가정에 따라  $\beta_1 \approx 1$ ,  $\beta_2 \approx 0.09$  라 놓을 때  $\beta_l$  과  $\sigma$ 는  $\beta_l \approx \sqrt{\frac{0.09}{\sigma}}$ 의 관계에 놓이게 된다. 따라서 주어진  $\lambda$ 에 대하여  $\beta_l$ 은 다음과 같이 근사적으로 사용할 수 있으며 그 모양은 그림 5에서 나타내었다.

$$\beta_l(\lambda) \approx \sqrt{\frac{0.09}{0.5565\lambda^2 + 2.7774\lambda - 7.6605}} \quad (7)$$

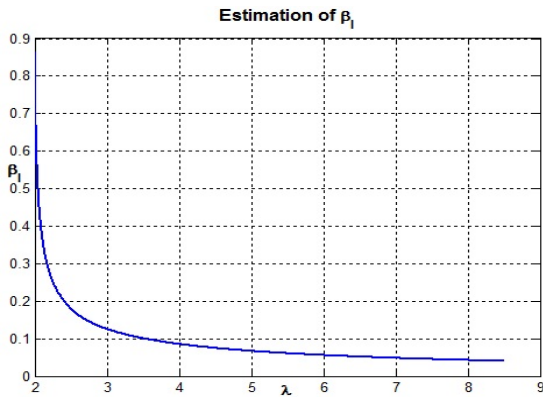


Fig. 5 Estimation of  $\beta_l$  for the given  $\lambda$

그림 5에 따르면 마찰을 무시한  $\lambda=2$ 인 경우에 비하여  $\lambda > 3$ 인 영역에서  $\beta_l$ 의 값이 급격히 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 유체 입자간 마찰력의 크기가 클수록 유체 입자가 더욱 작은 크기의 입자로 분화하여 난류항적 내 대부분의 구간이 well mixed 상태로 변화될 경향성이 더욱 크다는 것을 의미하는 것으로 앞서 2.1에서  $\lambda$ 와  $B(\xi)$ 의 모양에 관한 논의를 더욱 뒷받침하고 있다고 할 수 있다.

### 2.3. 잠수함의 난류항적 반지름 예측

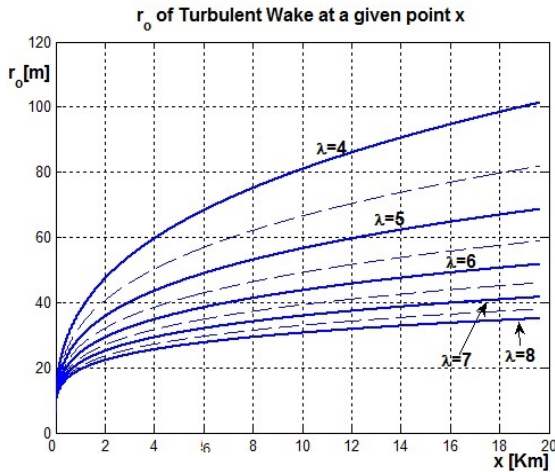


Fig. 6 Radius( $r_0$ ) of Turbulent wake at a given point  $x$  behind the moving submarine. The dashed line in between any two consecutive solid lines correspond to the  $\lambda$  which has the mean value of the two  $\lambda$  s of the lines

본 논문의 이론적 배경은 quasi-equilibrium state[7]로서 잠수함 난류항적 내 유체 난류가 well mixed된 상태이다. 이러한 상태가 되기 위해선 난류의 특성 크기  $l_t = \beta_l r_0$ 가  $r_0$ 에 비하여 상대적으로 작아야하기 때문에 그림 5를 참조하여  $\beta_l < 0.1$ 이하에 해당하는  $\lambda \geq 4$ 인 경우에 한하여  $r_0$ 를 계산 후 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 식 (4)에서 알 수 있듯이  $S_T$ 는 잠수함의 속도에 무관하기 때문에  $r_0$ 는 오로지  $\lambda$ 에만 의존한다.

그림 6에 의하면  $\lambda=4$ 인 경우 잠수함 후방 약 4Km에서 난류항적 반지름이 60m, 18Km 후방에선 약 100m에 달하고 있으나  $\lambda$ 가 증가할수록 반지름이 점차 감소하여  $\lambda$ 가 6인 경우 18Km 후방에서 반지름 약 50m,  $\lambda$ 가 7인 경우 18Km 후방에서 반지름 약 40m,  $\lambda$ 가 8인 경우 20Km 후방에서 도 반지름 40m를 넘지 못하고 있다. 만약 잠수함의 난류항적 반지름이  $\lambda=7\sim 8$ 사이의 값을 갖는다면 약 50m이상의 깊이에서 잠항하는 잠수함의 난류항적이 수면 위까지 떠오르는 매우 제한될 것으로 판단되나  $\lambda < 7$ 이라면 잠수함 탐색을 위한 매우 중요한 요소로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

### 2.4. 수면 위 난류항적의 탐색 가능성 예측

해수면 근처에는 바람에 의한 배경 난류 에너지가 존재한다. 따라서 잠수함 난류항적이 수면으로 부상할 때 바람에 의한 배경 난류에너지보다 큰 에너지를 갖고 있어야만 탐지가 가능하다. 본 절에서는 연구 목적상 잔잔한 해상상태인 약  $U_a = 4\text{m/sec}$ 의 바람이 부는 상황을 가정하고, 주어진  $\lambda$ 에 대하여 수면에서 탐색 가능한 난류항적의 길이와 지속시간을 살펴보고자 한다. 이를 위해 식 (8)을 사용하기로 하고 문제를 간단하게 하기 위하여  $x$ -축 수직 위에 해당하는 수면에 대하여 식 (8)을 계산하여 보기로 한다.

$$k_D = k(0,0) \left( 1 + S_T \frac{x}{L_s} \right)^{\frac{-2\lambda}{\lambda+2}} \frac{B(\xi)}{B_{\max}} - 10^{-6} U_a^2 \quad (8)$$

그림 7은 식(8)을 나타낸 것으로 잠수함으로부터 거리  $x$ 인 곳의 난류항적 중심으로부터 수직 위 방향의  $K_D$  분포를 나타내고 있다. 예를 들어 그림 7의상단의 경우 잠수함으로부터 약 7Km ( $x=7\text{Km}$ )후방에 있는  $K_D$ 의 반지름이 약 25m 이상임을 보여준다. 만약 잠수함이 수심 25m에서 움직인다면, 생성된 난류항적은 수면까지

도달하고 있음을 보여주고 있다. 이 경우 잠수함으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에  $r=0$ 인 경우에도 에너지 값이 비교적 적음을 알 수 있다. 반면  $x=500m$ 인 경우는 잠수함으로부터 가깝기 때문에  $r=0$ 에서 가장 높은 에너지 값을 갖고 있으며 위로 향할수록 에너지 값이 낮아지어 수면에 해당하는  $r=16m$  근처에서 0으로 수렴하는 현상을 보여주고 있다.

그림 7의 각 그림에 포함되어 있는 최 원거리  $x$ 에 대한  $K_D$ 의 모양은 최대 반지름을 갖는 난류항적의 위치가 아니라, 최대 반지름과 유사한 반지름을 갖고 있는 즉 탐색 가능한 최 원거리를 나타내고 있다. 주어진  $\lambda$ 와 속도  $U_s$ 마다 모든 그림을 그려야 하나 그 형태가 그림 7과 유사하기 때문에 생략하기로 하며 대신  $\lambda$  및  $U_s$ 에 따른 탐지 가능한 최대 반지름  $r_{max}$ 과 그 위치  $x(r_{max})$ , 유사한 반지름을 갖는 최장거리  $x_{max}$ 와 그때의 반지름  $r(x_{max})$ 을 표 3과 4에 나타내기로 한다.

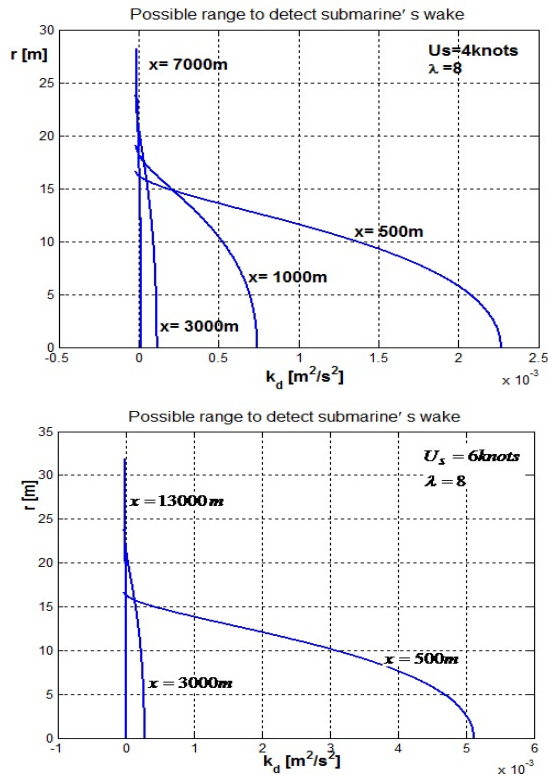


Fig. 7 Possible range to detect submarine's wake. Solid lines represent KD at the given points (x, r)

Table. 3 Submarine's maximum Radius and maximum detection range for the given  $\lambda$  on the surface: when  $U_s = 4knots, U_a=4m/s$

$\lambda$	4	5	6	7	8
$r_{max}$	77m	45.2	32m	25m	21m
$x(r_{max})$	24Km	12Km	8Km	5km	4Km
$x_{max}$	38Km	21Km	16km	10km	7Km
$r(x_{max})$	$\geq 70m$	$\geq 40m$	$\geq 25m$	$\geq 22m$	$\geq 20m$

Table. 4 Submarine's Maximum Radius and maximum detection range for the given  $\lambda$  on the surface : when  $U_s = 6knots, U_a=4m/s$

$\lambda$	4	5	6	7	8
$r_{max}$	94m	52.8m	36.5m	28m	23m
$x(r_{max})$	43Km	25Km	13Km	9km	6Km
$x_{max}$	63Km	40Km	30km	16km	13Km
$r(x_{max})$	$\geq 90m$	$\geq 45m$	$\geq 25m$	$\geq 25m$	$\geq 20m$

표 3, 4에 의하면 잠수함 난류항적의 크기와 탐지 범위에  $\lambda$  값이 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 동일한 속력이라도  $\lambda$ 가 4일 때 보다 8일 때  $r_{max}$ 는 약 4배,  $x(r_{max})$ 는 약 7배,  $x_{max}$ 는 약 5배 가까이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 난류항적의 발달과 탐지거리 즉 지속시간에 유체 입자간 마찰력이 핵심적인 요소로 작용하고 있음을 말해주고 있다.

이와 더불어 잠수함의 속력 역시 난류항적의 탐색에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 함의 속력을 4knots에서 6knots로 증가시켰을 때,  $r_{max}$ 에는 커다란 변화가 없는 반면  $x_{max}$ 와  $x(r_{max})$  모두 대략 2배 가까이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

함 속력이  $r_{max}$ 에는 커다란 변화를 만들지 못한다는 것은 식 (4)를 통해 이미 예견 가능한 부분이었다 할지라도, 높은 속도에서 항적의 크기가 더욱 클 것이라는 일반적인 믿음과는 달리 속도는 항적의 크기보다 탐지 거리를 증가시키는데 주요한 요인으로 작용하고 있음을 표 3, 4는 보여주고 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 잠수함 난류항적을 기술하기 위한 여러 파라미터를  $\lambda$ 만의 함수로 바꾸어 잠수함 난류항적을 예측할 수 있었다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 가.  $B(\xi)$ 는  $\lambda$ 가 커질수록 최댓값은 작아지는 반면 에너지는 분포 모양은 더욱 평평하여 졌다.

나.  $B(\xi)$   $\lambda$ 값에 따라 약간씩 차이는 있었으나 대략  $\xi \approx 0.6$  근처에서  $B(\xi) \approx \frac{B(\xi)_{\max}}{2}$ , 그리고  $\int_0^{\xi \approx 0.6} B(\xi) d\xi \approx 0.85 \int_0^1 B(\xi) d\xi$  인 형태를 보였다.

다.  $\lambda$ 의 고유치인  $\sigma$ 를  $\lambda$ 의 함수로 예측하는 방법을 제시하였다. (식 6 참조)

라. 난류항적의 에너지를 구하기 위해 필요한 파라미터  $\beta_l$ 을 구하는 방법을 제시하였고 (식 7 참조), 그 결과 임의의  $\lambda$ 가 아닌  $4 \leq \lambda \leq 8$  범위의  $\lambda$ 가 보다 현실에 부합한다는 사실을 발견하였다.

마.  $\lambda$ 는 항적의 확산 반지름과 최대탐지거리에 크게 영향을 미친다.  $\lambda$ 가 4에서 8로 증가할 경우  $r_{\max}$ 는 4배,  $x(r_{\max})$ 는 7배,  $x_{\max}$ 는 약 5배 감소하였다. 즉 유체입자 간 마찰이 난류항적의 확산에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

바. 반면 잠수함의 속도를 4knots에서 6knots로 증가시킬 경우  $x_{\max}$ 와  $x(r_{\max})$ 가 약 2배 증가하였다. 이는 잠수함의 속력이 난류항적의 지속시간에 커다란 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

사. 만약  $7 \leq \lambda \leq 8$  인 경우,  $r_0$ 는 50m 이하로서, 평균수심이 50m 이하인 서해에서는 수중의 적 잠수함 활동 감시가 가능할 것이나, 동해의 경우는 snorkel 흔적을 찾는데 유용하리라 판단된다.

본 논문은 실질적 해가 아닌 근사식  $B(\xi)$ 와 실측을 통해 얻어야 할 모든 파라미터를  $\lambda$ 의 함수로 변환시키는 방법을 통해 잠수함 난류항적의 물리적 특성을 예측하였다는 근원적 한계를 갖고 있지만, 과거에는 알 수 없었던 여러 가지  $\lambda$ 에 대한 난류항적의 물리적 성질을 상당부분 이해할 수 있었다는 것은 큰 성과라 할 수 있다. 이러한 노력으로 향후 잠수함 난류항적에 대한 실험적, 이론적 연구가 더욱 진행되길 희망한다.

### REFERENCES

- [1] Y. C. Lee, "The detectability of submarine's turbulent wake on the sea surface using Ship-wake Theory," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 773-779, Apr. 2011.
- [2] A. Yu. Benilov, "Ship-wake Turbulence", *Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow*, vol. 10, pp. 253-264, Jul. 1997.
- [3] J. H. Milgram, R. A. Skop, R. D. Peltzer, O. W. Griffin, "Modeling Short Wave Energy Distribution in the Far Wakes of Ships," *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, no. C4, pp. 7115-7124, Apr. 1993.
- [4] Y. C. Lee, "Analytical Solution of Non-dimensional Turbulent Kinetic Energy Distribution Function in the Turbulent Wake behind a Submarine," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 31-36, Feb. 2015.
- [5] Wikipedia. Sinpo-Class Submarine [Internet]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sinpo-class\\_submarine](http://en.wikipedia.org/wiki/Sinpo-class_submarine).
- [6] K. A. Hoffman, *Computational Fluid Dynamics Vol 3*, Wichita, Kansas, A Publication of Engineering Education System, ch. 21, pp. 66, 2000.
- [7] Monin, Yaglom, *Statistical Fluid Mechanics : Mechanics of Turbulence*. 2<sup>nd</sup> ed. The M.I.T Press, Cambridge, pp. 351 1981.



이용철(Yong-Chol Lee)

Stevens Institute of Technology 해양공학과 공학박사  
 ※관심분야 : 잠수함 난류항적, Air-Sea Interaction