자항하는 SUBOFF 모형 난류항적 계측 및 실험식 유도

Measurement of Turbulent Wake behind a Self-Propelled SUBOFF Model and Derivation of Experimental Equations

신 명 수* 문 일 성* 나 영 인** 박 종 천***
Myung-Soo Shin Il-Sung Moon Young-In Nah Jong-Chun Park

Abstract

This paper presents experimental results and derived experimental equations to investigate the turbulent wake characteristics generated by the self-propelled SUBOFF submarine model. A self-propelled SUBOFF model which was assumed as an axial-symmetric body was used to create wake, and a thin strut was mounted on the topside of the model. The experiments were conducted in a circulating water channel(CWC), and the hot-film was used to measure the turbulence in wake cross-section at the distance range of 0.0~2.0L from the model. The hot film anemometer measured turbulent velocity fluctuations, and the time-averaged mean velocity and turbulent intensity are obtained from the acquired time-series data. Measured results show well the general characteristics of turbulent intensity, kinetic energy and mean velocity distribution. Also, this paper presents derived experimental equations, which is extended result to the reference [1]. These experimental equations show well the general characteristics of the turbulent wake behind the self-propelled submerged body.

Keywords : Turbulent Wake(난류항적), Turbulent Intensity(난류강도), Turbulent Kinetic Energy(난류운동에너지), Self-propelled SUBOFF Model(자항하는 SUBOFF 모형), CWC Experiments(Circulating Water Channel, 회류수조실험), Experimental Equation(실험식)

1. 서론

자유 표면이 없는 수중 운동체의 움직임에 의해 선체표면과 추진기에서 난류가 발생하고 난류에 의한 입

자유동이 운동체의 후방에 항적(난류유동 항적)으로 존재한다.

잠수함, AUV 등의 유체역학적 특성을 파악하기 위하여, 물체 주위의 유속, 난류유장, 국부유동에 대한 많은 실험과 계산적 연구가 이루어져 왔다^[2~6]. 그러나, 상대적으로 관심이 적은 수중체 또는 추진기로 추진되는 수중체 후류의 난류, 유속항적에 관한 연구는 매우 드물다.

본 연구에서는 자항하는 수중운동체 후류의 유속 및 난류항적의 일반적인 특성파악에 대한 요구가 제시되

† 2011년 3월 14일 접수~2011년 5월 13일 게재승인

* 한국해양연구원(KORDI)

** 국방과학연구소(ADD)

*** 부산대학교(Pusan National University)

책임저자 : 나영인(nyi1972@kornet.net)

어 추진기가 장착된 잠수체 후류의 난류유장 계측결과 및 실용화를 위한 실험식유도 결과에 대하여 보고한다. 추진기 없는 경우에 대하여서는 신명수 외[1]에 보고되어 있고, 본 논문은 추진기를 장착한 경우의 결과에 대하여 논의한다.

공시모형으로 형상이 간단한 SUBOFF 모형에 MAU 시리즈 추진기를 장착하여, 회류수조(CWC : Circulating Water Channel)에서 저항과 추진기의 추력이 일치하는 자항상태에서 열선 유속계(Hot Film)로 모형 후류의 유속 및 난류량을 계측하였다. 계측은 성공적으로 수행되었으며, 이 결과로 실험식을 유도하였다. 이 실험식은 형상이 간단한 자항하는 잠수체 후류의 평균유속 및 난류량의 일반적인 특성을 파악하고, 유사형상의 정성적인 후류분석에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

2. SUBOFF 모형 및 계측시스템

가. 모형시험수조

모형시험은 일본에 소재한 FEL(West Japan Fluid Engineering Laboratory Co., Ltd.)의 고속 중형 회류수조에서 수행하였으며, 주요 제원 및 사진을 Table 1에 명시하였다.

모형의 난류향적 계측이 주목적인 바, 후방의 계측영역 확보를 위해 중형수조를 선택하였다. 정도향상을 위하여 모형의 크기를 1.4m로 제작하였으며, 모형 후방으로 길이 2배 이상의 항적을 계측할 수 있도록 하였다.

Table 1. Principal Dimension of Circulating Water Channel

최고 속도	6.0m/s
관측부 사양(m)	길이×폭×깊이 7.0×1.5×1.2	
동력부	110kw×2	

나. 모형 및 프로펠러

시험을 위한 공시모형으로서, 형상이 간단하고 많은 연구가 수행되고 있는 SUBOFF 모형을 선택하였다. 종방향 단면도 및 제작된 모형사진을 Fig. 1과 2에 각각 도시한다.

Fig. 1. Section profile of SUBOFF model

Fig. 2. Photographs of SUBOFF model

SUBOFF 모형의 길이는 1406.3mm이며, 단면 직경은 최대 164.0mm이다.

자항시의 난류향적계측을 위한 추진기는 MAU 시리즈 프로펠러이며, 사양은 다음과 같다.

- Diameter : 80mm
- Mean Pitch : 88mm
- Mean Pitch Ratio : 1.10
- Expanded Area Ratio : 0.5
- Boss Ratio : 0.18
- Direction of Rotation : Right Handed
- Number of Blade : 4

시험에 사용된 프로펠러의 사진 및 초당회전수(RPS) 15의 단독성능곡선을 Fig. 3과 4에 도시하였다.

Fig. 3. Photographs of model propeller(MAU Series)

Fig. 4. Propeller open water test results at 15 RPS (MAU series)

다. 모형 항적 난류계측 시스템

난류계측 시스템은 Fig. 5와 같이 구성되었다. SUBOFF 모형은 유선형의 수면관통부에 부착되었고, 내부에는 저장계측을 위한 동력계, 프로펠러 추진을 위한 모터가 탑재되었다. 수심은 프로펠러 축 중심을 기준으로 하여 300mm이며, 수면 파도에 의한 영향을 최소화하기 위하여 상부에 패널을 부착하였다. 균일유속은 1m/s이며, 추진기 초당회전수(RPS)는 15.3으로, 저항 0의 상태를 유지하였다.

평균유속 및 난류량은 열선유속계를 이용하여 계측하였다. 계측시스템은 Kanomax사의 켄기형 일자(-) 열선 센서(Hot film) Type 1075 및 앰프로 구성되며, 실험 개념도 및 계측시스템 구성도를 Fig. 5에 도시하였다. 피토투브(Pito Tube) 계측치와 비교했을 때, 열선 센서의 난류량 계측 오차범위는 균일류 중에서 TI (Turbulent Intensity)가 0.5% 이하 이다. 일자형 열선 센서를 채용함에 따라, 본 논문에서 계측된 모든 속도는 축방향(u) 속도이며, v , w 방향 속도성분은 무시되었다. 이들 성분 계측을 위해서는 많은 연구투자가 요망된다.

Fig. 5. Schematic diagram of turbulent measurement by Hot Film

Fig. 6. Measured velocity and kinetic energy ($x=1.0, y=0$)

계측된 샘플데이터를 Fig. 6에 도시한다. 평균유속 ($\bar{u}$) 및 난류운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy) 모두 0.01초 정도의 주기임을 알 수 있다. 본 계측에서는 한 주기에 15개의 자료취득이 가능하도록 데이터 취득간격(Sampling Rate)을 1.5KHz로 하였다.

3. SUBOFF 모형 난류항적 계측결과

가. 무차원화

SUBOFF 모형의 난류 항적 계측 및 실험식도출을 위한 좌표계는 Fig. 7과 같다. 모형 끝단 프로펠러 위치를 원점으로 하여 우수좌표계를 채용하였다. r 은 y - z 단면의 방사(Radial)방향 변위이다.

길이를 나타내는 x, y, z, r 은 모두 선박의 길이(L)로 무차원화 된 값을 나타내며, 운동에너지 k 및 유속 v 는 식 (1), (2)와 같이 무차원화 되었다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{v'^2} = \frac{KE}{\rho U_0^2} \quad (1)$$

$$v = \frac{u}{U_0} \quad (2)$$

여기서,

k	무차원화된 운동에너지
$u, \bar{u}, u'$	임의의 x, r 에서 유속, 평균유속, 유속의 섭동값
v	임의의 x, r 에서 무차원 유속
$\sqrt{u'^2}$	난류강도(Turbulent Intensity)
KE	실제의 운동에너지
ρ	물의 밀도
U_0	균일류 속도

Fig. 7. Coordinate system

나. 난류항적 계측

전술한 것처럼 모형과 계측시스템을 구성하여 회류수조에서 실험을 수행하였다. 계측시의 사진을 Fig. 8에 보인다. 열선유속계 센서는 자동이송장치를 이용하여 컴퓨터 원격조종으로 이동시켜 계측효율 향상을 시도하였다.

Fig. 8. Photograph of model and Hot-Film sensor

계측은 $x = 0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 의 6개의 단면에서 계측하였다. 각 단면에서의 계측점 수는 20개 이상이다.

각 x 단면에서 계측된 난류강도(T.I. : Turbulent Intensity) 및 평균유속(U/U_∞)을 Fig. 9에 보인다.

SUBOFF 모형은 축대칭 물체이기 때문에 축방향속도(u)는 좌우 대칭이며, v, w 는 비대칭이다. 본 계측에서는 계측기기의 한계로 일자형 센서를 사용하였기 때문에, u 만 계측되었으며, 좌우 대칭이어야 한다. $x = 1.0, 1.5$ 의 결과를 보면, 계측은 성공적으로 수행되었음을 알 수 있으나, 프로펠러 바로 뒤인 $x = 0.0, 0.25$ 부근은 프로펠러 위치에서 데이터가 산개함을 보이고 있다. 이는 프로펠러가 없는 경우에 비하여, 계측의 난이도가 높았기 때문이다.

계측값은 프로펠러에 의한 원주(Tangential) 방향의 회전속도가 존재함에도, 대칭성은 만족할 만하다. 프로펠러에 의한 유장의 가속으로 $x = 0.0$ 에서의 최고속도는 균일유속의 2배 정도임을 알 수 있고, $x = 2.0$ 의 위치에서 이 가속효과는 거의 소멸되고 있음을 알 수 있다.

4. 자항하는 SUBOFF 모형 난류항적 실험식

SUBOFF 모형을 축대칭물체로 가정하여 난류항적을 계측하였고, 결과의 실용적인 사용을 위하여 실험식도출을 시도하였다.

가. 난류 운동에너지 실험식

계측된 난류량으로 우선 프로펠러 중심축으로부터 방사방향 경계층 두께와 중심축에서의 최대 난류에너지를 구하고, 경계층내 분포를 간단한 산술식으로 도출하였다.

Fig. 9. Distributions of mean velocity and turbulent intensity(with propeller, from above $x = 0, 0.25, 1.0, 1.5$)

Fig. 10. Turbulent boundary thickness distribution to radial direction

1) 경계층 두께

계측된 결과로부터, 각 x 에서의 방사(Radial) 방향의 경계층 범위(두께) 분포 및 이로부터 유도된 실험식은 Fig. 10과 같으며, 식 (3)으로 표현하였다. 선체에 의한 경계층 두께가 지배적임으로 계측결과는 추진기가 없는 경우와 동일했다.

$$r_{max}(x) = 0.8(1+x)^{0.4} \quad (3)$$

2) 최대 난류에너지

x 방향으로 프로펠러 중심축에서의 최대 난류에너지를 Fig. 11에 도시한다.

같은 방법으로 실험식을 유도하였으며, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계측결과로부터 프로펠러축에서 가장 강한 난류에너지 양은 0.00914이며, 식 (4)를 도출하였다.

$$k_{max}(x) = 0.00914(1+x)^{-2.4} \quad (4)$$

여기서, r 은 방사(radial)방향 무차원 거리($\sqrt{y^2+z^2}$)이다.

3) 방사방향 난류에너지 분포

각 단면에서 계측된 난류 운동에너지를 Fig. 12에 모두 도시하였다.

각 $y-z$ 단면에서 프로펠러 중심축으로부터 $r_{max}(x)$ 까지 방사(Radial) 방향의 난류에너지 분포를 식 (3)에 의한 경계층 두께와, 식 (4)에 의한 최대 난류에너지

로 무차원화하여 도시하였다.

추진기의 영향으로 난류량의 변동이 매우 심하나, 전체적인 경향으로는 추진기가 없는 경우와 달리, 추진기 중심축에서 최대값을 보이며, 방사방향으로 갈수록 단순 감소하는 것을 알 수 있다.

실험데이터의 산포도로 볼 때, 실험식을 도출하기에 다소 무리가 따르나, 실제 유장을 정성적으로 파악하려는 의도로서, 단순 감소하는 1차 실험식 (5)를 도출하였다.

$$k_r(x, r) = 1 - \frac{r}{r_{\max}(x)} \quad (5)$$

Fig. 11. Maximum turbulent kinetic energy distribution

Fig. 12. Turbulent kinetic energy distribution in boundary layer

Fig. 13. Turbulent kinetic energy distribution by experimental equations

본 연구가 관련 분야 최초로 시도되고, 실험의 정도, 유장의 비선형성, 난류특성을 고려하면 추가적인 검증 연구가 필요할 것이다.

4) 임의 위치에서의 난류에너지 분포

계측된 결과로부터, 난류경계층의 두께, 중심축에서의 난류에너지 및 각 단면에서 경계층내의 난류에너지 분포를 실험식으로 도출하였다.

임의의 x , r 에서의 난류 운동에너지 분포는 식 (6)과 같으며, 식에서 우변의 첫째 항은 식 (4), 둘째 항은 식 (5)로 구할 수 있다. 식 (6)에 의한 난류에너지 분포도를 Fig. 13에 도시하였다.

$$k(x, r) = k_{\max}(x) k_r(x, r) \quad (6)$$

나. 평균유속 실험식

SUBOFF 모형은 축대칭 물체로, 프로펠러 중심축에서의 최대 유속을 갖는 경계층을 형성한다.

1) 프로펠러 중심축 유속분포

프로펠러 중심축에서의 x 방향으로 최대 유속분포는 Fig. 14와 같다. $x = 0.0$ 에서 유속은 1.8~1.9의 범위이나 외삽하여, 최대값을 균일류의 두배로 하였다.

또한, 추진기 없는 경우와 마찬가지로, 도시된 바와 같이 x 값이 3.3이면, 최대 유속이 균일류와 같아지므로 후류 경계층이 없어짐을 알 수 있다. 따라서, 식 (7)과 같이 프로펠러 축에서의 최대속도를 표현하는 실험식을 유도하였다.

$$v_{\max}(x) = (x + 1.0)^{-2.0} + 1.0 \quad (7)$$

단, $0 \leq x \leq 3.3$

Fig. 14. Distribution of maximum velocity along propeller axis($y = r = 0$)

Fig. 15. Mean velocity distribution in boundary layer(from above $x = 0.0, 1.0$)

Fig. 16. Mean velocity distribution by experimental equations

2) 경계층 내부 유속분포

전술한 난류에너지 분포와 같은 방법으로, 각 $y-z$ 단면에서 방사(Radial) 방향의 변위를 경계층 두께로 무차원화하여, Fig. 15에 $x = 0.1, 1.0$ 에서의 경계층 내부 유속분포도를 도시하였다. 프로펠러의 회전으로 인한 유장의 복잡성으로 $x = 0.0$ 에서 유속분포가 이중으로 나타났지만, 실제유장의 정성적 파악에 적용하려는 의도로서 단순 감소하는 1차식으로 표현하였다.

경계층 내부의 임의의 x, r 에서 평균유속 분포는 식 (8)로 하였으며, 이를 Fig. 16에 보인다.

$$v(x, r) = -[v_{\max}(x) - 1.0] \cdot \frac{r}{r_{\max}(x)} + v_{\max}(x) \quad (8)$$

단, $0 \leq x \leq 3.3, 0 \leq r \leq r_{\max}(x)$

도출된 실험식과 계측결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 그림에서 선체 후반부, 프로펠러의 효과가 잘 표현되어 있다.

이 실험식을 이용하면, 임의의 위치에서 자항하는 SUBOFF 후방의 난류에너지 및 유속을 손쉽게 구할 수 있으며, 형상이 다른 잠수체에 대하여서도 정성적으로 적용 가능 할 것이다.

5. 결론

본 연구를 통하여, 자항하는 SUBOFF 모형 후류의 난류량 및 평균유속을 회류수조에서 열선유속계로 계측하였다. 일자(-)형 센서로, 축대칭 물체로 가정하여 계측한 결과는 타당한 값을 보여주고 있다.

실용적인 목적을 위해 실험식이 도출되었다. 이 실험

험식은, 난류에너지 및 평균유속 분포, 특성을 잘 보여주고 있으며, 유사형상 후류의 정성적 분석에 유용할 것으로 판단된다.

추진기의 3차원 효과를 고려하고, 정확한 난류항적의 메커니즘연구를 위해서는 더 많은 연구노력이 필요하다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 핵심기술 응용연구 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 신명수, 문일성, 나영인, 박종천, “SUBOFF 모형 후방 난류항적 계측 및 실험식 유도”, 한국군사과학기술학회지, 제14권, 제2호, pp. 198~204, 2011.
- [2] 방형도, 박종천, 허재경, “KVLCC2M 모형선 주위 난류항적의 수치 시뮬레이션”, 대한조선학회 추계 학술대회논문집 pp. 769~776, 2007.
- [3] Chang, Y., Zhao, F., Zhang, “Numerical Simulation Of Internal Waves Excited by a Submarine Moving In The Two-Layer Stratified Fluid”, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Vol. 18, No. 3, Suppl., pp. 330~336, 2006.
- [4] 김 진, 박일룡, 반석호, “Calculation of Turbulent Flows around a Submarine for the Prediction of Hydrodynamic Performance”, Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 16~31, 2003.
- [5] 장진호, 박원규, “유동 방향 변화에 따른 잠수함 주위의 유동 특성과 유체동역학적 계수의 변화”, 대한조선학회논문집, 제43권, 제4호, 통권 148호, pp. 460~466, 2006.
- [6] Toda, T. et al., “Mean Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake of a Series 60 $C_B=0.6$ Model”, IIHR Report No. 326, 1988.