SUBOFF 모형 후방 난류향적 계측 및 실험식 유도

Measurement of Turbulent Wake behind a 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 the experimental result to investigate the characteristics of turbulent wake generated by submarine. A SUBOFF nude model which was assumed as an axial -symmetric body was used to create wake, and a thin strut was mounted on the top of the model. The experiments were conducted in a circulating water channel(CWC), and a 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, experimental equations are derived. These experimental equations show well the general characteristics of the turbulent wake behind the submerged body with simple configuration.

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

1. 서 론

잠수함, AUV 등의 유체역학적 특성을 파악하기 위하여, 물체 주위의 유속, 난류유장, 국부유동에 대한 많은 실험과 계산적 연구가 이루어져 왔다^[1~6]. 그러

나, 상대적으로 관심이 적은 수중체 후류의 난류, 유속향적에 관한 연구는 매우 드물다.

본 논문은 수중운동체 후류의 유속 및 난류의 일반적인 특성을 분석하고, 후류의 크기를 예측하기 위하여, 잠수체에 대한 난류유장 계측 모형시험 및 후류특성에 대한 실험식 유도에 대하여 논의한다.

공시모형으로 형상이 간단한 SUBOFF 모형을 채택하였으며, 추진기는 장착되지 않았다. 실험은 회류수조(CWC : Circulating Water Channel)에서 열선 유속계(Hot Film)로 모형 후류의 유속 및 난류량을 계측하였다. 계측은 성공적으로 수행되었으며, 계측결과로 후

† 2011년 1월 30일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

* 한국해양연구원(KORDI)

** 국방과학연구소(ADD)

*** 부산대학교(Pusan National University)

책임저자 : 나영인(nyi1972@kornet.net)

류에 대한 실험식을 유도하였다. 이 실험식은 형상이 간단한 잠수체 후류의 평균유속 및 난류량의 일반적인 특성을 파악하고, 유사형상의 정성적인 후류분석에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

2. SUBOFF 모형 및 계측시스템

가. 모형시험 수조

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

모형의 난류항적 계측이 주목적이기 때문에, 후방의 계측영역을 충분히 확보할 수 있도록 중형수조를 사용하였으며, 계측 정도 향상을 위하여, 모형의 크기를 1.4m로 제작하여 모형선 길이의 2배 이상 후방 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. 공시 모형

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

제작된 SUBOFF 모형 제원은 다음과 같다.

- Name : SUBOFF Model
- Length : 1406.3mm
- Section diameter Max. : 164.0mm

Fore View

After View

Side View

Fig. 2. Photographs of SUBOFF Model

다. 모형 항적 난류계측 시스템

난류계측 시스템은 Fig. 3과 같이 구성되었다. SUBOFF 모형은 유선형의 수면관통부에 부착되었다. 수심은 프로펠러 축 중심을 기준으로 하여 300mm이며, 수면 파도에 의한 영향을 최소화하기 위하여 상부에 패넌을 부착하였다.

평균유속 및 난류량은 열선유속계를 이용하여 계측하였다. 계측시스템은 Kanomax사의 췌기형 일자(-) 열선 센서(Hot Film) Type 1075 및 앰프로 구성되며, 실험 개념도 및 계측시스템 구성도를 Fig. 3에 도시하였다. 열선센서의 유속 계측 정확도는 피토투브(Pito Tube) 센서와 2% 범위 내에서 일치하며, 난류량 계측 정확도는 균일류 중에서 난류강도(Turbulent Intensity)가 0.5% 이하이다. 일자형 열선 센서를 채용함에 따라, 본 논문에서 계측된 모든 속도는 축방향 속도(u)이며, y , z 방향 속도성분은 무시되었다. 이들 성분 계측을 위해서는 많은 연구투자가 요망된다.

계측된 샘플데이터를 Fig. 4에 도시한다. 평균유속($\bar{u}$) 및 난류운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy) 모두 0.01초 정도의 주기임을 알 수 있다. 본 계측에서는 한 주기에 15개의 자료취득을 위하여 데이터 취득

간격(Sampling Rate)을 1.5KHz로 하였다.

Fig. 3. Schematic Diagram of Turbulent Measurement by Hot Film

Fig. 4. Measured Velocity and Kinetic Energy (x = 1.0, y = 0.37)

3. SUBOFF 모형 난류항적 계측결과

가. 무차원화

SUBOFF 모형의 난류항적 계측 및 실험식도출을 위한 좌표계는 Fig. 5와 같다. 모형 끝단 프로펠러 위치

를 원점으로 하여 우수좌표계를 채용하였다. r은 y-z 단면의 방사(Radial)방향 변위이다.

Fig. 5. Coordinate System

길이를 나타내는 x, y, z, r은 모두 선박의 길이(L)로 무차원화 된 값을 나타내며, 운동에너지 k 및 유속 v는 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, r에서 유속, 평균유속, 유속의 섭동값
v	임의의 x, r에서 무차원 유속
$\sqrt{\overline{u'^2}}$	난류강도(Turbulent Intensity)
KE	실제의 운동에너지
ρ	물의 밀도
U_0	균일류 속도

나. 난류항적 계측

2장에서 논의한 것처럼 모형과 계측시스템을 구성하여, 회류수조에서 실험을 수행하였다. 계측시의 사진을 Fig. 6에 보인다. 열선유속계 센서는 자동이송장치를 이용하여 컴퓨터 원격조종으로 이동시켜 계측효율 향상을 시도하였다.

계측 단면은 Fig. 7과 같이 6개의 단면에서 계측하였다. 각 단면에서의 계측점 수는 20개 이상이다.

각 x 단면에서 계측된 난류강도(T. I., Turbulent Intensity) 및 평균유속(U/U_∞)을 Fig. 8에 보인다. 여기서, y/R은 모형 반폭(B/2)으로 무차원화 된 y 값을 나타낸다. 추진기를 장착하지 않은 SUBOFF 모형은

축대칭 물체이며, 일자형 센서를 사용하였으므로 계측량이 좌우 대칭으로 나타나는 것이 당연하다. $x = 1.0$ 의 결과를 보면 계측은 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다. 또한, 모형 끝단인, $x = 0.0$, $y = 0.0$ 에서 유속 및 난류강도가 0.0에 잘 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6. Photograph of Model and Hot-Film Sensor

Fig. 7. Diagram of Measured Location

4. SUBOFF 모형 난류항적 실험식

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

Fig. 8. Distributions of Mean Velocity and Turbulent Intensity(without propeller, from above $x = 0$, 0.25, 1.0, 1.5)

가. 난류 운동에너지 실험식

계측된 난류량으로 우선 프로펠러 중심축으로부터 경계층 두께와 중심축에서의 최대 난류에너지를 구하고, 경계층내의 분포를 도출하였다.

1) 경계층 두께

계측된 결과로부터, 각 x 에서의 방사(Radial) 방향의 경계층 범위(두께) 분포 및 유도된 실험식은 Fig. 9와 같으며, 식 (3)으로 표현하였다. 계측결과와 실험식이 잘 일치하고, 타당함을 알 수 있다.

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

Fig. 9. Turbulent Boundary Thickness Distribution to Radial Direction

2) 최대 난류에너지

x 방향으로 프로펠러 중심축에서의 최대 난류에너지의 계측 값을 Fig. 10에 도시한다. 같은 방법으로 실험식을 유도하였으며, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계측결과로부터 프로펠러축에서 가장 강한 난류에너지 양은 0.00238이며, 식 (4)를 도출하였다.

$$k_{\max}(x) = 0.00238(1+x)^{-1.2} \quad (4)$$

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

3) 방사방향 난류에너지 분포

각 단면에서 계측된 난류 운동에너지를 Fig. 11에 모두 도시하였다. 각 $y-z$ 단면에서 프로펠러 중심축

으로부터 $r_{\max}(x)$ 까지 방사(radial) 방향의 난류에너지 분포를 식 (3)에 의한 경계층 두께와, 식 (4)에 의한 최대 난류에너지로 무차원화하여 도시하였다. 선체 바로 뒷부분은 난류경계층이 형성되어 있어, 증가 후 감소하며, 후방으로 갈수록 단순감소의 분포를 보인다. 2차함수를 이용하여 실험식 (5)를 도출하였다.

$$k_r(x, r) = 1 - \left(\frac{r}{0.8(1+x)^{0.4}} \right)^2 \quad (5)$$

Fig. 10. Maximum Turbulent Kinetic Energy Distribution

Fig. 11. Nondimensionalized Turbulent Kinetic Energy Distribution in Boundary Layer

4) 임의 위치에서의 난류에너지 분포

계측된 결과로부터, 난류경계층의 두께, 중심축에서

의 난류에너지 및 각 단면에서 경계층내의 분포를 실험식으로 도출하였다. 임의의 x , r 에서의 난류 운동 에너지 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. 12에 도시하였다.

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

Fig. 12. Turbulent Kinetic Energy Distribution by Experimental Equations

나. 평균유속 실험식

SUBOFF 모형은 축대칭 물체이므로, 프로펠러 중심축에서의 최소 유속을 갖는 경계층을 형성한다.

1) 프로펠러 중심축 유속분포

프로펠러 중심축에서의 x 방향으로 최소 유속분포는 Fig. 13과 같다. $x = 0.0$ 에서 유속이 0.0이 됨이 타당하나, 실제의 계측은 센서를 가능한 최대로 접근시킨 상태에서 계측되었고, 계측된 최소값은 0.2이다. 또한, 도시된 바와 같이, x 값이 3.3이면, 최소 유속이 균일류와 같아지므로 후류 경계층이 없어짐을 알 수 있다. 식 (7)은 실험결과로부터 유도된 유속분포 식이다.

$$v_{\min}(x) = \frac{x^{0.4}}{2} + 0.2 \quad (7)$$

단, $0 \leq x \leq 3.3$

2) 경계층 내부 유속분포

경계층 내부의 유속분포를 구하기 위해, 전술한 난

류에너지 분포와 같은 방법으로, 각 $y-z$ 단면에서 방사(Radial)방향의 변위를 경계층 두께로 무차원화하여, Fig. 14에 $x = 0.0, 1.0$ 의 분포도를 도시하였다.

Fig. 13. Distribution of Minimum Velocity along Propeller Axis($y = r = 0$)

Fig. 14. Mean Velocity Distribution in Boundary Layer (from above $x = 0.0, 1.0$)

경계층 내부의 분포는 식 (8)로 하였으며, 도출된 실험식과 계측결과는 잘 일치하고 있다.

$$v(x, r) = v_{\min}(x) + (1 - v_{\min}(x)) \cdot \frac{r}{r_{\max}(x)} \quad (8)$$

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

도출된 실험식에 의한 유장의 평균유속분포를 Fig. 15에 보인다. 선체 후반부, 프로펠러 단면의 경계층이 잘 표현되어 있다. 이 실험식을 이용하면, 임의의 위치에서 SUBOFF 후방의 난류에너지 및 유속을 손쉽게 구할 수 있으며, 형상이 다른 잠수체에 대하여서도 정성적으로 적용 가능할 것이다.

Fig. 15. Mean Velocity Distribution by Experimental Equations

5. 결 론

본 연구를 통하여 SUBOFF 모형 후류의 난류량 및 평균유속을 회류수조에서 열선유속계로 계측하였다. 일자(-)형 센서로, 축대칭 물체로 가정되어 계측된 결과는 타당한 값을 보여주고 있다. 그러나 프로펠러의 3차원 효과를 고려한 계측은 좀 더 많은 연구노력이 필요하다.

실용적인 목적을 위해 프로펠러가 없는 경우에 대하여 실험식이 도출되었다. 이 실험식은, 난류에너지 및 평균유속 분포, 특성을 잘 보여주고 있으며, 유사형상 후류의 정성적 분석에 유용할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 핵심기술 응용연구 사업의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- [1] 나영인, 허재경, 신명수, 문일성, 방형도, 최상문, 박종천, 문진권, “수중운동체 주위 난류향적 모델 개발”, 대한조선학회 춘계학술대회논문집 pp. 1017 ~ 1022, 2008.
- [2] 방형도, 박종천, 허재경, “KVLCC2M 모형선 주위 난류향적의 수치 시뮬레이션”, 대한조선학회 추계학술대회논문집 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] 김진, 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 제148호, 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.