수중운동체의 실린더 관 내부 이동시 작용력 예측에 대한 실험적 접근

여동진^{1,†} · 김연규¹ · 김동훈²
한국해양연구원 대덕분원¹
국방과학연구소²

Experimental Approach for Estimation of Hydrodynamic Force Acting on a Submerged Streamlined Body Translating in a One-end-opened Cylindrical Tube

Dong Jin Yeo^{1,†} · Yeon Gyu Kim¹ · Donghun Kim²
Daedeuk branch, Korea Ocean Research & Development Institute¹
Agency for Defense Development²

Abstract

The main object of this experiment is to estimate the hydrodynamic forces acting on a submerged streamlined body placed in a one-end-opened cylindrical tube moving with certain translational velocity. The best experimental design for this object is mimicking real situation, however sizes of model body and cylinder tube are just the same as those of real, for avoiding scale effects, mimicking real situation is not realizable. Hence, in this experiment, target body and cylindrical tube were designed to be towed with varying body position relative to cylindrical tube. For measuring hydrodynamic forces and flow velocity in the cylindrical tube, six one-component load cells and several one-hole Pitot tubes were used. Several conditions were checked with various end-plates those had different opening areas. Experiment results show that forces and flow velocity had different tendency with those expected, and the presence of a end-plate slows down the flow velocity in the cylindrical tube and affects pressure field in the tube to push the model submerged body forward of the tube. This tendency grows with decreasing opened area.

Keywords : Hydrodynamic force(유체력), Submerged streamlined body(유선형 물수체), One-end-opened cylindrical tube(1면 개방형 관), Load cell(분력계), One-hole pitot tube(1홀 피토관)

1. 서 론

수중에 존재하는 실린더 내부에서 자체 추진력으로 이동하는 수중운동체에 작용하는 유체력은 개방된 유체 중에서 수중운동체가 이동할 때 작용하는 유체력과 큰 차이를 가진다. 이러한 수중운동체의 실린더 내부 및 실린더를 벗어난 후의 거동을 추정하기 위해서는 수중운동체의 이동시 작용하는 유체력에 대한 추정이 필요하다. 그러나, 현재까지 이러한 연구가 수행된 예는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 실린더 내부에서 이동하는 수중운동체에 작용하는 유체력의 특성을 확인하고 이를 통해 수중운동체의 거동 추정을 위한 기반을 다지고자 하는 노력의 일환으로 예인수조에서의 시험을 계획하고 수행하였다. 실제 실린더 내부의 이동에 있어서는 실린더 한쪽 면이 막혀있는 상태에서 수중운동체가 이동하나 수조모형시험에서 이러한 상황을 모사하여 조건을

맞추는 것은 매우 어렵다. 이는 본 시험이 수조 시험에 있어 널리 알려진 문제점인 스케일 효과를 배제하기 위하여 실제 크기의 모형을 사용하였고, 실제 크기의 모형을 예인하는데 있어 예인전차에 발생할 수 있는 위치 부정확성이 실린더 관 내부에서의 수중운동체의 위치를 정확히 중앙에 맞추어야 된다는 제약조건을 만족하기에 어렵기 때문이다. 또한, 실린더 관 내부의 수중운동체를 예인하며 수중운동체에 작용하는 유체력을 계측하기 위해서는 실린더 관에 수중운동체와 예인전차를 연결하기 위한 길이 방향의 개방구를 만들어야 한다는 문제점도 발생하며 이는 관 내부 압력에 큰 변화를 발생시킬 가능성이 있다. 따라서 본 시험에서는 예인 전차에 실린더 관과 수중운동체를 함께 예인하는 형태로 작용 유체력에 대한 계측을 시도하였으며 수중운동체의 실린더 내부를 기준으로 한 상대 위치를 바꾸어 가며 실린더와 모형 수중운동체를 함께 예인하여 실제 수중운동체의 관내 이동 상태에 대한 유체력 예측을 모색하였다.

Fig. 1 Towing tank

또한, 이러한 실험의 수행에서 실제 상황과 시험 상황의 차이를 확인하기 위해 실린더의 후방을 일정 비율 막았을 경우에 대한 시험 결과의 변화를 확인하였다.

2. 시험장비 및 방법

본 장에서는 실험에 사용된 각종 장비에 대해서 설명하기로 한다.

실험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 예인수조에서 수행되었다. 예인수조의 제원은 다음과 같으며, Fig. 1에 예인수조 사진이 실려 있다.

- 길이 200 m, 폭 16 m, 깊이 7 m
- 예인전차 : 최대속도 6.0 m/sec
- 조파기 및 소파장치

2.1 저항·자항시험 장비

본 연구에서는 실린더 외부 및 실린더 내부에서 수중운동체에 작용하는 유체력을 계측하기 위한 저항 및 간이자항시험이 수행되었으며 이를 위한 계측 장비로는 1축 분력계를 사용하였다.

Fig. 2 1-Component load cells

또한, 수중운동체의 추진기를 모사한 반전 프로펠러의 추력과 토크를 계측하기 위하여 반전 동력계(CRP dynamometer)를 사용하였다. 분력계는 선수쪽 스트럿에 X, Y, Z 방향의 1축 분력계가 설치되어 있고, 선미부 스트럿에 마찬가지로 X, Y, Z 방향의 1축 분력계가 설치되어 있다. 저항·자항시험에서는 X 방향 동력계만 이용하여 계측하면 되지만, 모형선의 정렬상태를 파악하고 수정하기 위해서 Y, Z 방향의 분력계도 설치하여 계측하였다. Fig. 2에 1축 분력계의 사진이 나타나 있고, Fig. 3에는 모형 수중운동체에 설치된 선수부 분력계와 선미부 분력계 사진이 나타나 있다. Fig. 4에는 모형 수중운동체에 설치된 반전 동력계와 모터의 방수 케이스 사진이 나타나 있다.

(a) Fwd. part load cells

(b) Aft. part load cells

Fig. 3 Setup of load cells

Fig. 4 Counter rotating propeller dynamometer and waterproof casing

시험에 사용된 1축 분력계의 용량은 다음과 같다.

- X1, X2 : 100 lbf (45.4 kgf)
- Y1, Y2 : 500 lbf (226.9 kgf)
- Z1, Z2 : 500 lbf (226.9 kgf)

시험에 사용된 반전 동력계는 각각의 프로펠러에 대한 2개의 추력 분력계와 2개의 토크 분력계로 구성되어 있으며, 반전 프로펠러 구동에 사용된 모터는 5 kW 용량의 모터이다. 각 추력 및 토크 분력계의 용량은 다음과 같다.

- 추력 분력계 : 250 N
- 토크 분력계 : 7 N·m

2.2 유속계측 장비

유속 계측을 위한 방법은 여러 방법이 있으나 (Ahn et al. 1997, Choi et al. 1999), 본 시험에서는 수중운동체 주위 유속 계측을 위해 1-hole Pitot-static tube를 설치하였다. 유속을 계측하기 위해서 모형 수중운동체에 tube를 설치할 경우 tube에 의한 추가 저항이 모형선에 발생하게 되므로 이의 해소를 위해 실린더에 설치하였다.

Fig. 5 1-Hole Pitot-Static tube

Fig. 6 Setup of 1-hole Pitot-Static tube

실린더내의 유속은 실린더의 좌우로 전후방향 각각 3군데에서 계측하였다(총 6 위치). 또한 각 위치에서는 실린더의 내벽에서 중심방향으로 3곳에 Pitot-static tube를 설치하여 내벽으로부터의 거리에 따른 유속 변화도 추정할 수 있도록 하였다. Pitot-static tube의 번호는 실린더 앞쪽으로부터 V1, V2, V3로 되어 있고, 좌현에 있는 경우 L, 우현에 있는 경우 R을 사용하며, 실린더 벽으로부터 떨어진 순서에 따라 outer, middle, inner로 표시하였다.

Fig. 5에는 시험에 사용된 1-hole Pitot-static tube가 나타나 있으며, Fig. 6에는 실린더에 장착한 모습이 나타나 있다.

Fig. 7 Cylinder

(a) End-plate with 67% opened area

(b) End-plate with 33% opened area

Fig. 8 End-plates

3. 시험 모형

실험에 사용된 수중운동체 모형과 실린더는 모두 실선과 같은 크기로 제작되었다. (수중운동체 폭장비 약 1:12) 모형의 선수부는 우레탄폼을 사용하여 제작되었으며 몸체와 제어판 및 추진기는 알루미늄 소재를 사용하였다. 난류 발생을 촉진시키기 위해 난류 발생장치로 stud를 사용하였다.

모형 수중운동체 내부의 각 분력계는 선수부 소형 스트럿과 선미부 소형 스트럿에 의하여 실린더 또는 대형 스트럿과 연결되어 있다.

모형 수중운동체는 수중에서 분력계에 자중에 의한 힘이 과도하게 작용하지 않도록 스티로폼을 모형 수중운동체 내부에 설치하였으며, 실린더의 경우 내부에 설치된 모형 수중운동체 주위의 유속 변화에 영향을 미치지 않도록 외부에 부력재를 설치하였다. Fig. 7에는 실린더와 모형 수중운동체 스트럿 연결 부위 및 유속 계측 위치의 사진이 나타나 있으며 Fig. 8에는 실린더 후면에 부착한 후면판이 나타나 있다.

Table 1 시험 항목

Test Type
Bollard (실린더 외부 상태)
저항시험 (실린더 외부 상태, 내부 상태)
자항시험 (실린더 외부 상태, 내부 상태)
후면판 모사 시험 (실린더 내부 상태)

4. 시험 종류

Table 1은 각 본 연구에서 수행된 시험 수행 항목을 보여준다.

유속은 Pitot-static tube를 사용하여 각 위치에서의 동압과 정압의 차를 계측하고 계산에 의해 유체 속력을 추정하는 방법을 사용하였다. 유속 계측 위치는 실린더 관의 회전방을 기준으로 했을 때 후방으로

- 1) 기준 수중운동체 전장의 절반 길이
- 2) 기준 수중운동체 전장의 20%
- 3) 기준 수중운동체 전장의 절반기준 약 10%

에 각각 위치하며 원주 방향으로는 수중운동체의 외판과 실린더의 내판간 절반위치를 3등분 하는 세 지점(실린더관 내판 위치 제외)을 계측위치로 하였다.

Fig. 9 Open water condition

Fig. 10 Position 1

Fig. 11 Position 2

Fig. 12 Position 3

모형 수중운동체가 실린더 내에 위치하는 상태는 총 3가지 상태에 대하여 시험을 수행하였으며 각 상태는 Figs. 10~12에 나

타나 있다. 또한, 모형 수중운동체가 실린더 외부에 위치하는 상태(Fig. 9)에 대한 시험도 수행하였다.

모형 수중운동체 중심의 물수 깊이는 수면으로부터 2.2 m이었으며, 시험 당시의 수온은 매일 측정하여 해당 상태에서의 밀도를 해석에 사용하였다.

5. 시험 해석 방법

5.1 좌표계

시험결과 해석에 사용된 좌표계는 Fig. 13과 같이 전진 방향이 +X, 우현 방향이 +Y, 연직하방이 +Z인 좌표계로 설정하였다.

Fig. 13 Coordinates system

저항 계수의 무차원화는 아래와 같이 전진속도 U와 운동체의 침수표면적에 의하여 표시하는 방법을 사용하였다.

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho S_{wet} U^2} \quad (1)$$

5.2 저항시험(Resistance Test)

저항시험은 크게 실린더 내 저항시험과 실린더외 저항시험으로 나눌 수 있다. 저항시험에서는 모형 수중운동체의 예인시에 작용하는 저항을 계측하고 무차원 저항계수를 구해낸다. 추진기 또는 추진기와 duct가 있는 모형 수중운동체의 저항시험에서는 duct와 추진기를 제거하고 추진기가 위치한 자리에 dummy hub를 장착하여 시험을 수행하였다. 저항은 통상적인 해석 방법인 마찰저항 성분과 잉여저항 성분으로 나누어 해석하는 방법을 사용하였으며 마찰저항의 추정에는 ITTC 마찰저항 공식을 사용하였다. (Lewis, 1988)

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (2)$$

실린더내 시험의 경우 Pitot-static tube를 사용하여 각 지점의 압력차에 의한 수두차를 측정하고 유속을 추정하였다. 유속과 측정된 수두(H)와의 관계는 다음 식과 같다. (g: 중력가속도)

$$V = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

5.3 간이 자항시험 (Self-Propulsion Test)

간이 자항 시험은 추진기 작동에 의한 토크가 자항동력계의 토크 허용치 이하인 수준에서 프로펠러 회전을 부여하고 예인 속도를 바꾸어 가면서 추진기의 추력과 토크, X방향의 힘을 계측하였다. 또한, 실린더외 자항시험의 결과는 저항시험의 결과와 비교하여 추력감소계수를 추정하였다. 추력감소계수를 구하는 식은 다음과 같다. (R: 계측 저항, t: 추력감소계수, T: 계측 추력) (Lewis 1988)

$$X = R + (1 + t) T \quad (4)$$

실린더 내 자항시험의 경우 실린더 내 저항시험과 마찬가지로 Pitot-static tube를 이용하여 유속을 추정하였다.

6. 시험 결과

시험은 자유 수면의 영향을 최대한 제거하기 위하여 모형 수중운동체 중심의 물수 깊이를 2.2 m로 하여 수행되었다. 시험 속도는 자유 수면의 영향이 나타나지 않는 상태에서의 최대 속도 2.0 m/sec까지 수행되었다.

6.1 저항시험

모형은 실선의 100% 크기로 제작되었다. 실린더내 모형시험의 경우 모형 수중운동체의 위치를 바꾸어가면서 시험이 수행되었다 이 때, 모형의 선수가 실린더관의 앞부분과 일치하는 위치를 제1위치, 모형의 약 30%가 앞으로 나온 위치를 제2위치, 모형의 약 60%가 앞으로 나온 위치를 제3위치로 설정하였다.

유속 계측 결과에서 각각의 유속 표시에 대한 설명은 다음과 같으며, 표와 그림에서의 유속 계측값들은 시험속도로 무차원화된 값이다.

예: V1LO(P1)/U

V1 : 유속 계측 위치 (실린더관의 입구로부터 V1, V2, V3임)

L : 좌현에 설치된 Tube (우현에 설치된 Tube의 경우 R임)

O : 실린더관의 벽으로부터 가장 가까운 Tube (M-중간, I-가장먼 Tube)

P1 : 실린더관에 대한 모형선 제1위치 (P2-제2위치, P3-제3위치)

/U : 시험속도로 무차원화

그림에는 비교상의 편의를 위해서 O와 I에서 계측한 값만 표시하였다.

저항시험의 결과는 Fig. 14~16에 나타났다. 실린더외에서 작용하는 저항이 가장 작게 나타났으며 실린더내 1위치가 가장 큰 값을 보였고 실린더내 2, 3위치의 경우는 큰 차이가 나타나지 않

는 유사한 결과를 보였다. 이는 실린더내 1위치의 경우 다른 위치에 비해 유동이 실린더내로 유입되는 것이 저해되기 때문에 상대적으로 모형 수중운동체의 선수부 압력이 크게 나타나기 때문으로 예상된다. 실린더 내 2, 3 위치의 경우 모형의 선수부가 일정 정도 이상으로 돌출되어 있으므로 실린더내 유동 유입이 유사하게 이루어질 것으로 예상되고, 두 상황의 차이는 실린더 외로 노출되어 있는 모형의 중앙 평행부 부분이다. 중앙 평행부의 경우에는 마찰저항에서 차이를 보일 수 있는데 실린더 내 2 위치인 경우 유속 계측지점 1과 2의 유속 측정 결과를 보면 마찰저항에서 큰 차이를 보일 정도의 유속 차가 나타나지 않으므로 두 위치에서의 마찰저항 차이는 크게 나타나지 않을 것으로 예측된다.

본 시험의 경우 실린더도 모형과 함께 예인되며 실린더 후면이 뿔려있는 상태로 예인을 하게 되는데 이 경우 실제 실린더에서 수중운동체가 진행되는 상황과는 다른 상황이 벌어지게 된다. 즉, 실제 실린더에서 수중운동체가 진행되는 상황에서는 수중운동체

Fig. 14 Resistance coefficient (Ct, Cr)

Fig. 15 Flow velocity (Resistance test, position 1, w/o end-plate)

Fig. 16 Flow velocity (Resistance test, position 1, end-plate 1)

Fig. 17 Flow velocity (Resistance test, position 1, end-plate 2)

후방의 유동이 실린더 후부로 빠져나가는 상황은 발생하지 않게 되는데 본 시험과 같이 실린더가 함께 예인되는 경우에는 유동이 실린더 후부로 빠져나가게 되어 수중운동체가 존재하는 부분 이후에도 일정 유속이 존재하게 되며 이는 실제 상황과 발생 압력 면에서 차이를 보이게 된다.

또한 이러한 현상은 실린더 외 시험과 실린더 내 시험의 저항 값이 큰 차이를 보이는 것의 원인이 되는 것으로 보인다.

6.2 자항시험

자항시험에서는 실린더 외 Bollard 테스트, 실린더의 dummy 토크 측정 테스트를 수행하였다. 속도에 따른 추력 변화를 나타내는 그림에서는 전부 프로펠러와 후부 프로펠러에 작용하는 추력들을 더하여서 표시하였다.

유속 계측 결과(Fig. 17)에서 각각의 유속 표시에 대한 설명은 저항시험의 결과 표시와 같고, 유속 계측값들은 시험속도로 무차원화된 값이다.

저항시험에서는 각 상태에 대한 추력감소계수를 비교하였으며 Fig. 18~21에 그 결과를 나타냈다. 추력감소계수는 실린더 외에서 가장 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 실린더 내 1위가 실린더 내 2, 3위치보다 작게 나타나고 실린더 내 2, 3 위치가 유사한 정도로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 추력이 (-)로 계측되는 값들에 대해서는 추력감소계수를 구하지 못하였다.

6.3 후면부 형상모사 시험

Figs. 22~27은 후면부 형상모사 시험의 결과를 분석한 그림

Fig. 18 Thrust deduction factor

Fig. 19 Flow velocity (Self-propulsion test, position 1, w/o end-plate)

이다. 형상모사 시험의 결과는 저항계수와 추력감소계수를 통해 분석하였다. 후면판 형상모사 시험은 후면판이 없는 경우, 후면판의 전개 직경이 큰 경우(후면판 1), 전개 직경이 보다 작은 경우(후면판 2)로 나누어서 수행되었다.

시험 결과 저항의 경우 후면판의 전개 직경이 작아지면 실린더 내 유체의 흐름이 방해되어 실린더 내 유동의 정체가 생기고 이에 따라 실린더 내 압력이 높아져 잉여 저항이 작아지는 것으로 나타났다.

후면판의 전개 직경이 가장 작고 위치 실린더 내 위치 2, 3에 놓여 있는 경우에는 모형의 선수부와 선미부 압력차가 역전 현상을 보여 실린더 내 유체가 모형 수중운동체를 밀어내는 효과를 주는 현상까지도 나타났다.

Fig. 20 Flow velocity (Self-propulsion test, position 1, end-plate 1)

Fig. 21 Flow velocity (Self-propulsion test, position 1, end-plate 2)

Fig. 22 Resistance coefficient (w/o end-plate)

Fig. 25 Thrust deduction factor(w/o end-plate)

Fig. 23 Resistance coefficient (End-plate 1)

Fig. 26 Thrust deduction factor(End-plate 1)

Fig. 24 Resistance coefficient (End-plate 2)

Fig. 27 Thrust deduction factor(End-plate 2)

Figs. 25~27은 후면부 형상모사 시험으로 얻어진 추력감소계수의 그림이다. 후면판 전개 직경이 작아지면 실린더 외 추력감소계수 경향과 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 후면판 전개 직경이 작고, 실린더 내 위치 2, 3에 놓여 있는 경우 추력감소계수는 실린더 외 추력감소계수보다 작고, 속도에 따른 변화가 거의 없거나 속도가 커지면 오히려 작아지는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 유선형 수중운동체가 한쪽 면이 막힌 실린더관 내부를 이동하는 상황일 때 작용하는 유체력을 모형시험을 통해 예측하기 위한 시도를 하였다. 이를 위해 수중운동체와 실린더관 모형을 제작하고, 예인수조에서 저항 및 자항 계측 장비와 유속 계측 장비를 이용하여 일련의 모형시험을 수행하고 해석하였으며 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

실린더 외 저항·자항시험과 실린더 내 저항·자항시험을 수행하여 모형선의 저항 특성 및 자항 특성을 얻었다. 실린더 내 시험의 경우 모형의 위치를 3가지 위치로 바꾸어가면서 시험을 수행한 결과 실린더 외에서 작용하는 저항이 가장 작게 나타났다. 수중운동체가 실린더관 내부에 존재하는 경우에 대해서는 수중운동체의 전면부가 실린더관 출구와 나란하게 놓였을 경우 저항이 가장 큰 값을 보였고, 수중운동체 전면부가 실린더관 출구에서 1/3 가량 전진해 놓여 있는 경우와 2/3 가량 전진해 놓여 있는 경우의 저항값은 유사한 결과를 보였다. 이는 수중운동체의 전면부가 실린더관 출구와 나란하게 놓였을 경우 다른 위치에 비해 유동이 실린더관으로 유입되는 것이 저해되기 때문에 상대적으로 선수부 압력이 크게 나타나기 때문으로 예상된다.

본 실험과 같이 실린더가 모형과 함께 예인되며 실린더 후면이 뚫려있는 상태로 예인을 하는 경우 실제 실린더에서 수중운동체가 진행되는 상황과는 다른 결과가 얻어지게 되는 것으로 판단된다. 이는 실제 실린더에서 수중운동체가 진행되는 상태에는 수중운동체 후방의 유동이 실린더 후부로 빠져나가는 상황이 발생하지 않는데 비해 실린더가 함께 예인되는 경우에는 유동이 실린더 후부로 빠져나가기에 되어 실제 상황과 발생 압력 면에서 차이를 보이게 되기 때문으로 판단된다. 따라서, 실제 상황에 부합하는 결과를 얻기 위해서는 실린더를 고정된 상태에서 수중운동체만을 직진시키며 유체력을 계측할 수 있는 다른 형태의 실험을 고안하는 것이 필요하다 생각되며, 그러한 실험의 고안에 있어 수치해석 기법 등을 응용할 경우 본 실험의 결과가 해당 기법의 검증 등에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 논문의 내용은 관내 유체력 특성 모형시험(PGS197A) (Kim et al. 2009) 및 후면판이 존재하는 관내 유체력 특성 모형시험(PGS2180) (Yeo et al. 2009)의 연구 결과를 제한수역에서의 선박 운항 시뮬레이션 기술 고도화(PES149F) 과제의 지원을 받아 정리한 결과입니다.

참 고 문 헌

- Ahn, J.W., Song, I.H., Park, T. S., 1997, "Experimental and Numerical Studies of the Flowfield around an Axisymmetric Body", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 34, issue 3, pp. 9-18
- Choi, J.E. Seo, H.W. & Min, G.S., 1999. Flow Measurements on the Propeller Plane Using Fiber Optics LDV at Towing Tank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(3), pp.22-28.
- Kim, Y.G. et al., 2009. Test for estimating hydrodynamic force on a submerged body in a cylinder. *Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI Report*, MOERI/KORDI (Confidential).
- Lewis, E.V., 1988. *Principles of Naval Architecture Volume II Resistance, Propulsion and Vibration*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp.3-7.
- Lewis, E.V., 1988. *Principles of Naval Architecture Volume II Resistance, Propulsion and Vibration*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp.145-157.
- Yeo, D.J. et al., 2009. Test for estimating the hydrodynamic characteristics of a model in the pipe with back plate. *Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI Report*, MOERI/KORDI (Confidential).

여 동 진

김 연 규

김 동 훈