

Bow Thruster가 있는 POD 추진 크루즈선의 Crabbing 시험

여동진^{1,†}

한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소¹

On the Crabbing Tests of Cruise Vessel Equipped with Bow Thrusters and POD System

Dong Jin Yeo^{1,†}

Maritime & Ocean Engineering Research Institute/KIOST¹

Abstract

International Towing Tank Conference (ITTC) recommended verifying a ship's ability to move transversely at zero forward speed without altering heading by a crabbing test. In sea trial, all available propellers/rudders/thrusters should be used to find the maximum possible transverse speed.

For estimating crabbing ability in the design stage, tests to estimate possible swaying force and yawing moment range using all available propellers/rudders/thrusters are conducted. By butterfly diagram, which compares possible swaying force and yawing moment range with external swaying force and yawing moment by wind, a ship's crabbing ability can be estimated. In this study, model tests of a cruise vessel equipped with bow thrusters and POD system were conducted to find out her crabbing ability in the design stage. To mimic quay condition, a model quay-wall was set in the towing tank.

Keywords: Crabbing test(크래빙 시험), Quay-wall(안벽), Cruise vessel(크루즈선), POD(포드 추진기), Bow thruster(바우스러스터), Butterfly diagram(나비형 도표)

1. 서론

본 연구에서는 안벽 근처에 위치한 선박이 바람의 영향을 받고 있을 때 이러한 바람의 영향을 극복하고 횡방향으로 움직이거나 자신의 위치를 유지할 수 있는 능력을 보유하고 있는가에 대하여 실험적으로 검증하는 방법인 crabbing 시험에 대하여 살펴보았다. Crabbing 거동은 주 추진기, 타, 선수/미 thruster에 의해 구현되나 본 연구의 대상선에는 POD 추진기와 3기의 선수 thruster가 장착되어 있으므로 이러한 POD 추진기가 장착되어 있는 선박의 crabbing 성능을 검증하는 시험 방법에 대하여 살펴보았다. Crabbing 시험의 결과는 통상적으로 횡방향 힘과 회두 모멘트를 각각 그래프의 X축과 Y축으로 놓고 선박이 보유한 거동제어장치(본 연구의 경우 선수 thruster들과 POD 추진장치)를 사용할 때 발생하는 힘과 회두 모멘트 및 선박이 바람의 영향하에 놓이게 될 때 예상되는 바람에 의한 힘과 회두 모멘트를 도시/비교하는 방법으로 분석된다. 본 연구에서는 대상선박의 crabbing 성능 예측을 위하여 풍력의 경우 풍동시험 결과를 기초로 예측하였으며 선박의 거동제어장치에 의해 발생하는 힘과 모멘트를 예측하기 위하여 수조모형시험을 수행하였다.

2. 시험 장치 및 구성

본 연구에서는 항만의 안벽 근처에서의 상황을 모사하기 위해 선형시험수조에 간이 안벽을 설치하여 시험을 수행하는 것을 계획하였다. 간이 안벽은 항만에서의 조건을 고려할 수 있게 수심에 제한 조건을 부여할 수 있도록 하였다.

모형선의 경우 대상 선박이 선수 thruster가 부착되어 있는 선박이므로 선수 thruster의 작동을 모사할 장치가 필요하게 된다. 여기에서는 시험에 사용된 간이 안벽과 모형선의 준비 과정을 기술한다.

2.1 간이 안벽

Crabbing 거동이 필요한 지역은 일반적으로 항구와 같이 수심이 낮고 안벽에 근접한 지역이므로 시험 상황에 있어서도 이와 같은 조건을 부여하기 위한 장치가 필요하게 된다. 이러한 간이 안벽의 경우 기준이 되는 항구를 설정하고 항구의 수심을 고려하여 안벽의 심도 조건을 부여하는 것이 타당하다. 그러나, 본 연구의 대상선박을 적용하기 위한 항구가 확정된 상태가 아니었으

로 심도 조건은 임의로 선택된 조건에 대해 수행하였다. 본 시험에서는 심도 조건으로 H/D = 2.0을 선택하였다. (H: 수심, D: 흘수)간이 안벽은 폭이 선폭의 3배 가량, 수심/흘수비가 2.0이상이 될 수 있도록 설계하였다. 간이 안벽은 수조의 좌우측 벽면과 수조 초입부의 end beach에 거치될 수 있도록 설계되었으나, 안벽의 중간 부분은 자중에 의해 처짐 현상이 발생할 가능성이 크므로 수조 바닥면으로부터의 지지봉을 설치하여 처짐 현상을 방지할 수 있도록 설계되었다.

Fig. 1은 안벽을 설치하는 과정을 보여주고 있으며 Fig. 2는 설치된 안벽에 시험 수행을 위해 모형선을 접근 시키고 있는 광경을 보여준다.

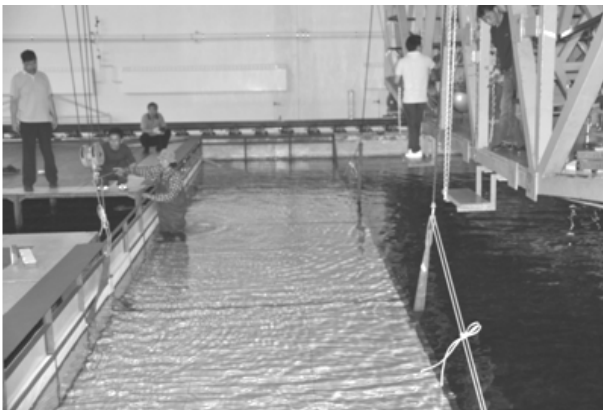


Fig. 1 Setup of a model quay-wall

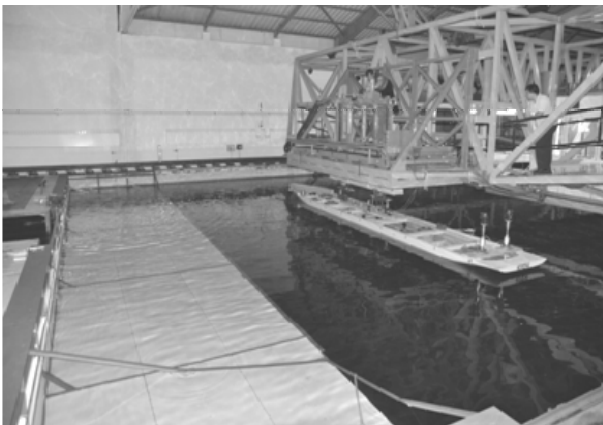


Fig. 2 Approach of model ship to the quay-wall

2.2 Thruster

본 연구의 대상인 크루즈선은 선미에 POD 추진기를 가지며 선수측에 3기의 bow thruster를 가지고 있다.

POD 추진기의 경우 기하학적 상사 모형을 사용하는 것에 큰 문제가 없으나 bow thruster의 경우 별도로 실제 thruster의 기하학적 상사 모형을 제작/설치하는 것이 사실상 어려우므로 DP(Dynamic Positioning) 시험을 수행할 때 사용하는 thruster를 개조하여 사용하였다. Thruster의 추력 조건 모사와 관련하여 모

사 장비로는 실제 thruster가 발생할 수 있는 추력 조건을 동일하게 만드는 것이 사실상 불가능하므로 사용한 추진기가 발생시킬 수 있는 최대 추력 조건을 부여하여 이에 대한 적절한 확장을 통해 실제 선수 thruster가 발생시킬 수 있는 추력/모멘트를 추정하는 방법을 채택하였다.

또한, thruster 모사에 있어 설계된 선박에는 3기의 추진기가 배치되어 있지만 모형선에는 공간적인 문제 때문에 1기의 thruster만이 배치 가능하였으므로 1기의 thruster를 작동시킨 결과를 바탕으로 한 예측이 불가피한 상황이었다. Fig. 3은 1기의 모형 thruster를 모형선에 장착한 사진이다. 모사된 thruster의 경우 장비의 형태가 실제 thruster와 같이 "L"형으로 되어 있으며 실제 선수 thruster와 같이 회전 방향에 따라 좌현/우현 추진의 추력이 다르게 나타난다. 그러나 모사된 thruster의 좌현/우현 추력 변화 특성이 실제 선수 thruster의 추력 변화 특성과 동일하다고 볼 수 없으므로 본 시험에서는 thruster 추력 방향에 따라 추진기의 설치를 반대로 하여 추력 방향을 변경하는 방법을 사용하여 이러한 영향을 배제하였다.

Fig. 4는 시험에 사용된 POD 추진기이다. 실선의 POD 추진기는 구동축을 중심으로 360°회전이 가능하나 시험에 사용된 POD 추진기의 경우 POD 추진기의 스트럿이 180°회전을 할 경우 선체와의 간섭이 발생하므로 실질적인 최대 회전각은 ±150°로 제한되는 형태이다.

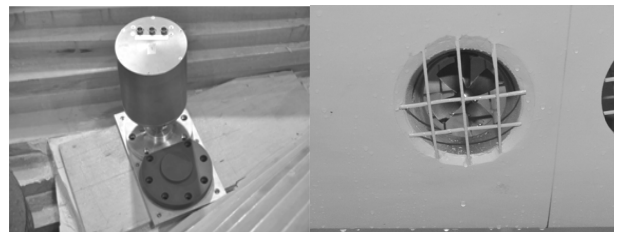


Fig. 3 Installation of bow-thruster



Fig. 4 POD propulsion system

2.3 계측장비

시험 계측은 예인 전차에서 HPMM 시험에 사용되는 계측 시스템

템을 사용하였다. 계측 항목으로는 선체의 전후방향 힘(X1, X2), 좌우방향 힘(Y1, Y2), 상하 방향 힘(Z1, Z2)과 좌우 POD 추진기의 전후, 좌우 방향 힘, 추력, 회전수를 들 수 있다. 선체 작용력의 경우 선체 중앙부에서 전(1)/후(2)로 60cm 거리에 설치되어 있는 분력계를 통해 계측되었다. Fig. 5는 계측에 사용된 시스템의 사진이다.



Fig. 5 HPMM device

3. 시험 조건의 검토 및 시험 Matrix

3.1 POD 추진기의 추력 조건 검토

POD 추진기의 추력 조건은 다음과 같은 과정을 통해 설정되었다. 먼저, 크루즈선의 예상 최대 선속일 때 추진기로 인해 발생하는 토크를 확인하였다. 두 번째로는 이러한 토크를 축계 및 엔진이 견뎌낼 수 있는 한계 토크로 가정하고 Bollard 상태에 대하여 동일한 토크를 얻을 수 있는 추진기의 회전수를 추진기 단독 특성 결과를 바탕으로 추정하였다. 이렇게 얻어진 프로펠러 회전수는 5.36rpm이었으며 본 회전수를 POD 추진기의 최대 추력 회전수로 설정하였다.

3.2 Thruster의 추력 조건 검토

본 시험에서 thruster는 기하학적 상사 모형이 아닌 thruster 1기만이 부착되었으므로 실제 thruster에 의해 발생할 수 있는 상황을 엄밀히 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 따라서, thruster의 추력 조건도 이러한 한계 내에서 결정되었다. 본 시험에서는 모사된 thruster의 최대 작동 rpm을 시험 최대 rpm로 설정하고 본 최대 rpm와 이의 80%, 60% 추력을 발생시키는 rpm을 부여하는 방법으로 추력 조건을 설정하였다. 모사된 thruster의 최대 작동 rpm는 35rpm이며, 80%, 60% 추력 조건의 rpm는 각각 31, 27 rpm로 나타났다.

3.3 Crabbing 시험 Matrix

Crabbing 시험은 일반적으로 안벽 근처에서 POD 추진기 및

선수 Thruster를 작동시켜 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 추정하는 시험이다. 이는 통상적으로 선폭의 50% 정도 거리를 두고 수행되는데(Shin & Lee 2004) POD 추진기 및 선수 Thruster의 조건에 따라 시험 Matrix가 결정된다. 본 시험에서도 간이 안벽으로부터 모형선을 선폭의 50% 거리에 두고 실험을 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 수행된 Crabbing 시험의 Matrix를 나타내고 있다. Crabbing 시험 조건에서 POD 추진기는 -150° ~ 150° 를

Table 1 Test matrix

Type of Test	POD Angle	POD RPS	Thruster Direction	Thruster RPS
Thruster Only	-	-	STBD, PORT	27 31 35
POD Only	0° $\pm 30^{\circ}$ $\pm 60^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 120^{\circ}$ $\pm 150^{\circ}$	5.36 4.79 4.15	-	-
Thruster POD Combination	0° $\pm 30^{\circ}$ $\pm 60^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 120^{\circ}$ $\pm 150^{\circ}$	5.36 4.79 4.15	STBD, PORT	35

30° 간격으로 나누어 조건을 부여하였으며, 각 각도에서 POD 추진기의 추진력 조건을 각각 100%, 80%, 60%로 주어 시험을 수행하였다. POD 추진기 조건의 경우 $\pm 180^{\circ}$ 는 모형 POD 추진기와 선체와의 간섭으로 인해 부여할 수 없었으므로 $\pm 150^{\circ}$ 를 POD 추진기의 최대각도 조건으로 부여하였다. 그러나 이러한 제한의 경우 추후에 수록된 실험 결과를 확인해 보면 선속방향 힘과 모멘트에 있어 매우 작은 양을 발생시킬 것으로 예측되므로 crabbing 영역의 확인에는 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다. 양현의 POD 추진기는 동일한 각도로 움직이도록 하였으며, thruster 단독시험의 경우 POD 추진기와 동일하게 100%, 80%, 60%의 추력 조건을 발생시키도록 하였고, POD 추진기와의 조합 시험의 경우 100%의 추력을 발생시키도록 하였다. Thruster의 추진 방향은 우현/좌현을 각각 부여하였다.

4. POD 추진기 / Thruster 에 의한 힘과 모멘트 분석

4.1 Thruster에 의한 힘과 모멘트

Thruster의 작동에 의해 얻어진 선속 방향의 힘과 회두 모멘트를 Fig.6과 7에 제시하였다.

본 결과에서는 thruster의 추진 방향에 따른 차이는 크게 보이지

지 않았으며 실험 결과는 그래프의 X축에 대한 대칭 형태로 나타났다. 이는 thruster의 작동에 의해 교란되는 유체 영역이 안벽의 존재에 의한 영향을 받기에는 충분히 넓지 않기 때문인 것으로 생각된다.

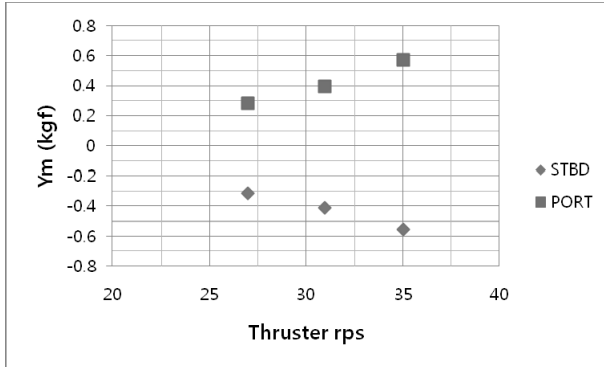


Fig. 6 Side force (Thruster only)

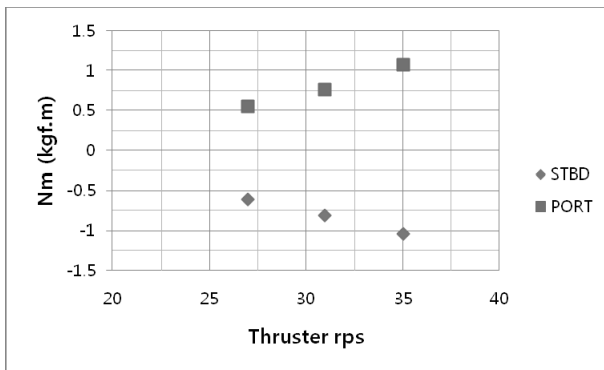


Fig. 7 Yaw moment (Thruster only)

4.2 POD 추진기에 의한 힘과 모멘트

POD 추진기의 각도 및 회전수를 변화시키며 작동시켜 얻어낸 선측 방향의 힘과 회두 모멘트를 Fig.8과 9에 제시하였다.

POD 추진기 작동에 의한 결과에서는 안벽의 존재에 의한 영향이 확연히 보여지고 있는데 먼저, 계속되는 힘과 모멘트 면에서 POD 추진기의 프로펠러 후류가 안벽 쪽을 향하고 있는 상태(각도 음인 상태)의 힘과 모멘트가 더 크게 계속되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 함께, 양의 각도 영역과 음의 각도 영역의 그래프 경향도 다르게 나타나는 것도 확인할 수 있다.

특기할 만한 결과는, 직관적으로 생각하였을 때 POD 추진기의 각도가 $\pm 90^\circ$ 일 경우 선측 방향 힘과 회두 모멘트가 가장 클 것으로 예상되나 실험 결과 POD 추진기의 각도가 $\pm 60^\circ$ 인 경우에서 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 POD 추진기의 프로펠러 후류가 안벽 쪽을 향하는 경우에 더 잘 보여진다. 이렇게 최대값이 나타나는 각도가 직관과 다르게 나타나는 것은 프로펠러의 작동에 의한 좌우 불평형력을 주 원인으로 생각하기에는 그 각도가 매우 크다. 따라서, 이러한 현상의 원인

은 POD 추진기에 의해 교란된 유체가 안벽 및 바닥면에 의해 영향을 받아 결과적으로 선체 주위의 압력 분포를 다르게 형성시키기 때문일 것으로 판단된다.

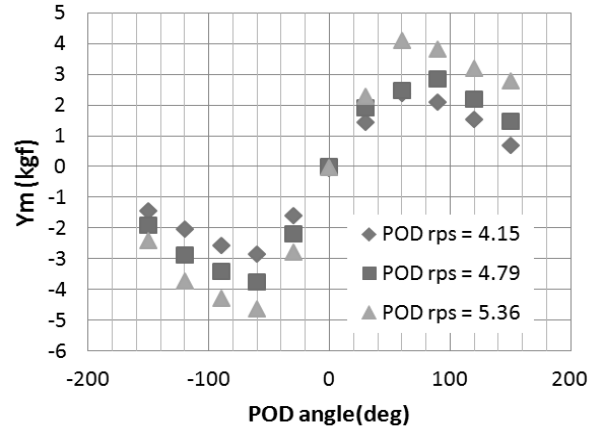


Fig. 8 Side force (POD only)

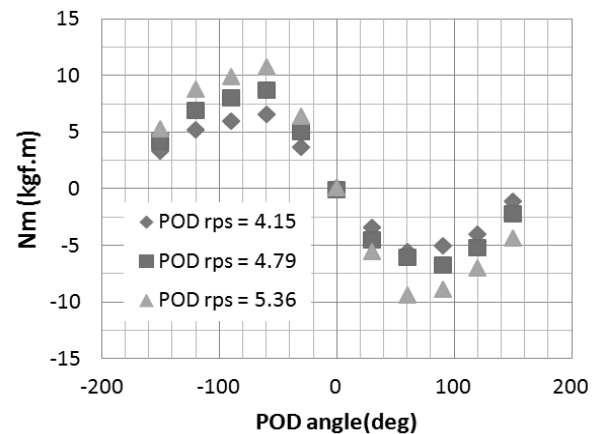


Fig. 9 Yaw moment (POD only)

4.3 POD 추진기와 Thruster 조합에 의한 힘과 모멘트

Fig.10과 11은 POD 추진기와 thruster 를 모두 작동시키면서 얻어낸 선측 방향의 힘과 회두 모멘트를 나타낸 그래프이다. 그 그래프에서 PORT, STBD로 표현된 것은 thruster의 추진 방향이며 시험 조건에서 언급한 것과 같이 thruster 회전수는 35rps로 설정하였다.

얻어진 힘과 모멘트를 살펴보면 POD 추진기 단독 시험의 결과와 유사하게 안벽과 바닥면의 존재에 의해 POD 추진기 추력 방향에 따른 힘과 모멘트의 크기 차이가 보여지며, $\pm 60^\circ$ 근방에서 힘과 모멘트의 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

결과에서 각 POD 추진기 각도별, POD 추진기 회전수 별로 thruster의 작동 방향에 따라 나타나는 힘과 모멘트 차이는 thruster 단독 시험에서 thruster의 작동 방향에 따른 힘과 모멘트

차이와 유사한 값을 보였으며, 이 결과에 따라 모형 실험시에는 thruster의 추력 특성이 POD 추진기의 작동에 의한 영향을 받지 않았다고 판단할 수 있으며 반대로 thruster도 POD 추진기의 추력 특성에 영향을 주지 않았다고 판단할 수 있다.

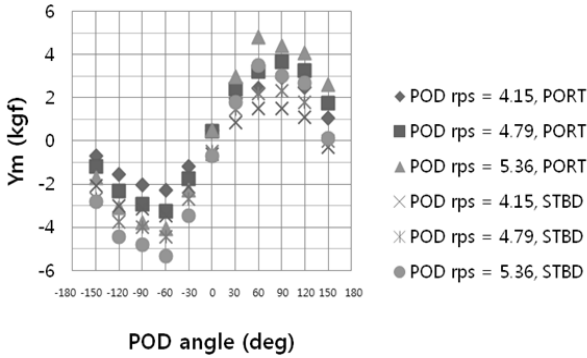


Fig. 10 Side force (POD & thruster)

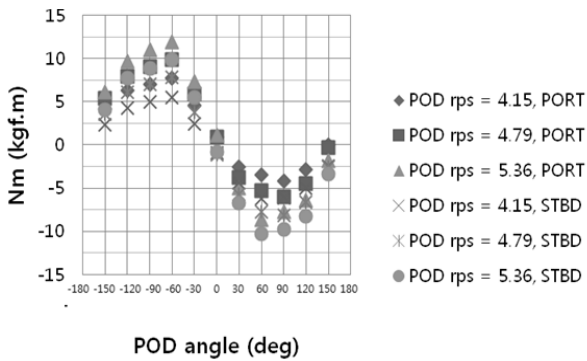


Fig. 11 Yaw moment (POD & thruster)

5. POD 추진기 및 Thruster 작동에 의한 Crabbing 성능 추정

5.1 풍력의 추정

Crabbing 시험의 결과로 제시하게 될 butterfly diagram을 작성하기 위해서는 크루즈선에 작용하는 풍력을 추정하여야 한다.

풍력은 아래와 같은 식을 통해 추정하게 되며 풍력의 계산에 필요한 풍압 계수는 풍동시험의 결과를 사용하였다.

$$\begin{aligned} X_{WIND} &= -\frac{1}{2} \rho_{air} V_{RW}^2 A_T C_X(\gamma_{RW}) \\ Y_{WIND} &= \frac{1}{2} \rho_{air} V_{RW}^2 A_L C_Y(\gamma_{RW}) \\ Z_{WIND} &= \frac{1}{2} \rho_{air} V_{RW}^2 A_L C_{OA} C_N(\gamma_{RW}) \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서 ρ_{air} 는 공기의 밀도이고 C_X, C_Y, C_N 은 풍력 및 모멘트

계수이며 γ_{RW} 는 상대풍향, V_{RW} 는 상대 풍속, A_T 와 A_L 은 각각 종 방향 풍압면적과 횡방향 풍압면적을 나타내며 L_{OA} 는 선박의 전장을 의미한다.

바람의 방향은 선미 쪽에서 불어오는 바람의 방향을 0° , 우현 쪽에서 불어오는 바람의 방향을 90° , 선수 쪽에서 불어오는 바람의 방향을 180° 로 정의하였다.

풍력계수는 크루즈선 상부 구조물에 대한 항공우주연구원의 풍동시험 수행 결과를 사용하였다. Fig. 12는 풍동시험으로부터 얻어낸 풍력계수를 도시한 그림이다.

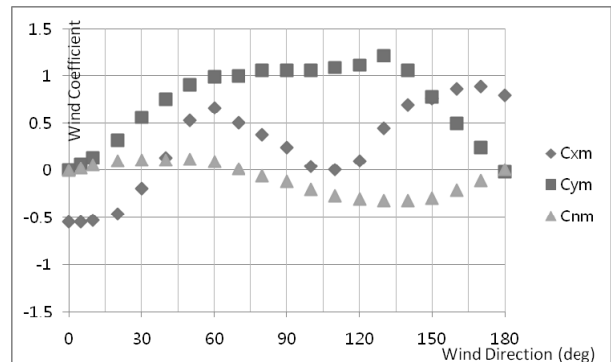


Fig. 12 Wind coefficients (Experiment, KARI)

풍동시험에서는 좌표계의 원점을 전장의 절반 위치에 설정하였으나 일반적으로 선박의 조종성능 해석에 있어서는 midship을 기준으로 하므로 풍력계수를 midship에 대한 값으로 변경하였다.

5.2 Butterfly diagram

Crabbing 모형시험 결과 및 풍동시험 결과를 통해 대상선의 crabbing 성능을 추정할 수 있게 된다. Fig. 13은 풍동시험의 결과로 추정된 풍력과 모멘트를 butterfly diagram 형태로 표현한 그림이다. Butterfly diagram은 풍력(F_y)을 X축으로 하고 풍압모멘트(M_z)를 Y축으로 하는 형태의 그림으로 풍속에 따라 diagram의 면적이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이제, Fig. 13과 같은 바람의 영향에 대한 butterfly diagram에 실험을 통해 얻어낸 POD 추진기와 thruster의 영향을 실선 확장하여 나타낸 힘과 모멘트를 표기하여 crabbing 성능을 추정하게 된다.

실선에 있어 thruster에 의한 작용력/모멘트는 thruster간의 간섭이 발생하지 않는다는 가정하에 추정되었다. Thruster의 작용력/모멘트 추정에 있어 이와 같은 가정을 바탕으로 먼저 실선의 thruster 사양서에 제시된 최대 power를 확인하고 이에 적절한 추력 예측 계수를 곱하여 실선 thruster 1기의 추력을 예측하였다. 추력 예측 계수는 Brix (1992)에 제시된 값인 130kN/kW를 사용하였다. Thruster에 의해 발생하는 회두 모멘트는 추력에 작용팔이 곱해진 것과 같다고 가정하여 추정하였다. 이러한 회두 모멘트의 추정에 있어 시험이 수행된 1기에 대한 작용팔은 thruster 단독시험으로부터 얻어진 회두 모멘트를 선측방향 힘으로 나누는 방법으로 예측하였으며, 나머지 2기 thruster의 작용팔은 기준이

되는 1기 thruster의 작용팔에 기준 thruster의 선체 중심에서부터 떨어진 거리에 대한 다른 2기 thruster의 거리 비율을 곱하여 얻어냈다.

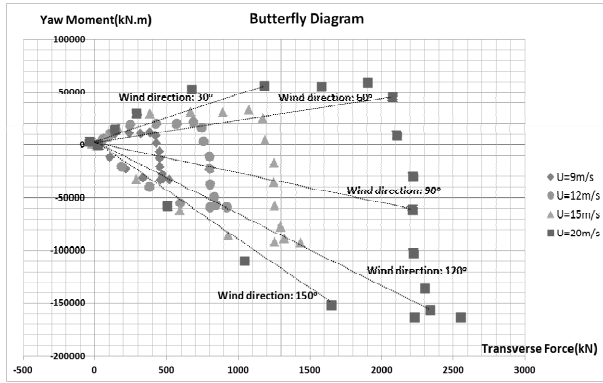


Fig. 13 Wind force & Moment butterfly diagram

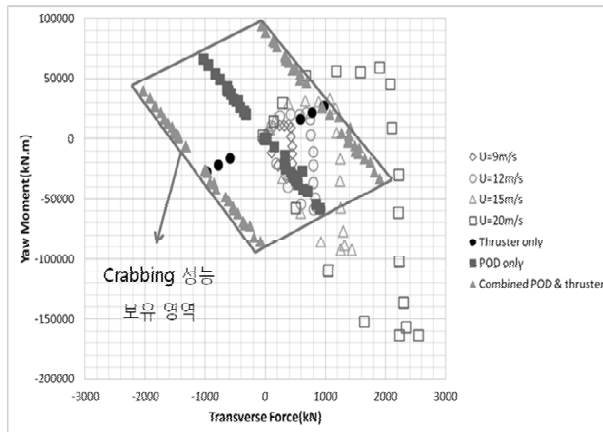


Fig. 14 Butterfly Diagram

Fig. 14는 이렇게 얻어진 힘과 모멘트를 Fig.13의 butterfly diagram에 나타낸 결과이다. 그림에서 나타낸 마름모 영역이 thruster와 POD 추진기로 발생시킬 수 있는 선측 방향 힘과 횡두 모멘트 영역이고, 이 영역의 내부에 풍속 12m/s 때 발생하는 힘과 모멘트 영역이 존재하므로 본 선박은 풍속 12m/s인 경우에도 crabbing 성능을 보유할 것을 예상할 수 있다.

결론

본 연구에서는 POD 추진기와 bow thruster를 가지고 있는 크루즈선에 대하여 안벽 근처에서 바람의 영향을 극복하고 횡방향으로 움직이거나 자신의 위치를 유지할 수 있는 능력을 실험적으로 검증하는 방법인 crabbing 시험에 대하여 살펴보았다. POD 추진기의 추진 조건은 저항/자항 시험에서 얻어진 최대 토크 이내의 토크 조건을 갖는 조건으로 설정하였다. Bow thruster의 경우 공간적인 제약으로 인하여 1기를 설치하고 이를 가동한 결과를 기반으로 bow thruster의 마력대비 작용력 경험

식과 설계상 부착 위치 등을 고려하는 방법으로 작용력과 모멘트를 추정하였다.

Thruster 단독 시험 결과에서는 안벽에 의한 영향이 크게 나타나지 않았으나 POD 추진기를 사용한 시험의 결과에서는 안벽 및 바닥면에 의한 영향으로 보여지는 현상들을 확인할 수 있었다. 즉, 동일한 크기의 POD 추진기 각도 조건에서 POD 추진기의 프로펠러 후류의 방향이 안벽쪽을 향하는지 그 반대의 경우인지에 따라 예측되는 힘과 모멘트의 크기가 다르게 얻어졌으며, 힘과 모멘트의 최대값이 $\pm 60^\circ$ 부근에서 얻어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 POD 추진기에 의해 교란된 유체가 안벽 및 바닥면에 의해 영향을 받아 결과적으로 선체 주위의 압력 분포를 다르게 형성시키기 때문일 것으로 판단된다. 이러한 현상은 POD 추진기에 의해 교란된 유체의 교란 방향이 POD 추진기 각도에 따라 변화하기 때문에 발생하는 특이 현상으로 생각되며, 일반적인 프로펠러와 타를 사용하는 선박에서는 프로펠러와 타에 의해 교란되는 유체의 방향이 주로 선체의 종방향으로 형성되기 때문에 이러한 현상이 크게 보이지 않을 것으로 예상된다.

시험의 결과를 바탕으로 예측한 crabbing 성능 해석에 있어 본 연구의 대상선은 풍속 12m/s인 경우에도 crabbing 성능을 보유할 것으로 예상되었다.

후기

본 논문의 내용은 cruise선의 crabbing 성능 추정 기법 개발(PNS136B) 과제의 내용(Youn, et al., 2010의 일부)을 제한수역에서의 선박 운항 시뮬레이션 기술 고도화(PES149F) 과제의 지원으로 정리한 것입니다.

참고 문헌

- Brix, J.E., 1992. *Manoeuvring Technical Manual*. Seehafen Verlag, Hamburg, p.11.
- Shin, H. & Lee, H.L., 2004. Crabbing Test of a 3m Ferry Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(1), pp.40-46.
- Youn, Y. et al., 2010. *Development of Safety Technology for Next-generation Value-added Ships(1st Step Report)*, Ministry of Commerce, Industry and Energy Technical Report. pp.489-493.



여 동 진