

방파제 형상 연직구조물 부근을 항행하는 대형선박에 미치는 간섭력에 관한 연구

† 이 춘 기

† 한국해양대학교 항해학부 조교수

A Study on the Hydrodynamic Force Acting on a Large Vessel in the Proximity of Breakwater

† Chun-Ki Lee

† Assistant Professor, Div. of Navigation Science, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 제한수역에서 측벽부근을 대형선박이 항행할 경우, 측벽으로 인하여 발생하는 유체력이 대형선박의 조종운동에 상당히 크게 영향을 미친다는 것은 잘 알려져 있다. 이 논문에서는 방파제형상을 하고 있는 측벽 부근을 대형선박이 항행하는 경우, 선박과 방파제 형상간의 간섭력 추정을 위해 세장체 이론을 토대로 한 계산 방법을 적용하였으며, 선박에 미치는 측벽의 영향을 파악하기 위하여 방파제길이, 방파제와 선박간의 거리 및 수심을 변수로 하여 선박과 측벽과의 간섭력을 수치 계산하였다.

핵심용어 : 제한수역, 유체력, 세장체이론, 방파제, 수심, 선박조종운동

Abstract : It is well known that the hydrodynamic forces and moments induced by the proximity of bank in confined waters, such as in a harbour or narrow channel affect ship's maneuvering motion. In this paper, the calculation method based on the slender body theory for estimation of the hydrodynamic force between ship and breakwater is applied, and also, the characteristic features of hydrodynamic force acting on a large vessel in the proximity of a breakwater are described and illustrated. Furthermore, the effects of water depth and the lateral spacing between ship and breakwater are summarized and discussed.

Key words : Confined water, Hydrodynamic force, Slender body theory, Breakwater, Water depth, Maneuvering motion

1. 서 론

일반적으로 항행선박에 비하여 폭이 좁은 협수로 혹은 수심이 얇은 천수역과 같은 제한수역에 측벽 혹은 교각과 같은 구조물이 존재하고, 대형 선박이 이러한 측벽 혹은 교각과 같은 구조물 부근을 항행하는 경우, 측벽과 같은 구조물로 인하여 대형선박에 미치는 간섭의 영향은 대단히 크게 작용한다. 특히, 대형선박이 측벽으로부터 받는 유체력은 선박조종운동의 관점에서 보았을 때 상당히 중요한 문제이고, 측벽의 형상과 거리, 수심 및 항행선박의 속도에 따라 대형선박이 측벽으로부터 받는 유체력의 특성은 급격하게 변하게 될 것이며, 결국 측벽으로 인한 간섭 작용 및 외력 등이 복합적으로 작용하여 선박조종운동이 상당히 복잡해지고, 선장 및 도선사의 의도와는 달리 대형 해양사고로 이어질 수 있는 위험성이 상당

히 높다. 따라서 대형선박이 측벽부근을 항행하는 경우, 측벽의 형상에 따른 유체력의 특성을 명확하게 추정하는 것이 대단히 중요하다. 한편, 지금까지 항행선박이 측벽과 같은 장애물로부터 받는 유체력의 추정에 대해서는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔고(Yeung, 1978, Davis, 1986, Kijima et al., 1987, 1991, Yeung et al, 1980), 현재는 이러한 연구 결과들을 바탕으로 실용화하는 연구가 조금씩 진전되고 있는 상황이다. 이와 같은 상황에서 이 연구도 협수로 통항안전 조건의 관점에서 보았을 때, 제한수역에서의 대형 해양사고 방지를 위한 움직임의 하나로 대형선박이 측벽으로부터 받는 간섭 영향에 대해서 고찰 하려고 한다. 따라서 이 논문에서는 대형선박이 방파제 형상을 하고 있는 측벽 부근을 항행하는 경우, 방파제의 길이, 방파제와 항행선박간의 횡방향 및 종방향 거리, 그리고 수심의 변화에 따른 항행선박과 측벽과의 간섭영향에 대해

† 교신저자 : leeck@hhu.ac.kr 051)410-4277

주) 이 논문은 “방파제 형상 연직구조물 부근을 항행하는 대형선박에 미치는 간섭력에 관한 연구”란 제목으로 “2013 공동학술대회 한국항해항만학회논문집 (해군사관학교, 2013.6.27-28, pp. 25-26)”에 발표되었음.

서 검토하였다.

2. 이론적 배경

먼저 Fig. 1에 나타난 것처럼 방과제형상을 하고 있는 측벽 부근을 지나는 선박을 가정하자. Fig.1에 표시한 것처럼, 공간 고정좌표계 $o-xy$ 와 방과제형상의 측벽 부근을 항행하는 선박의 선체중심을 원점으로 하는 선체고정좌표계 $o_1-x_1y_1$ 을 생각할 수 있다. 여기서, 선박은 선속 U 로 방과제형상의 측벽부근을 직진하는 것으로 가정하고, 선체 중심선으로부터 방과제형상의 측벽까지의 횡방향거리를 S_p , 선체중심으로부터 방과제형상까지의 종방향거리를 S_T 로 한다.

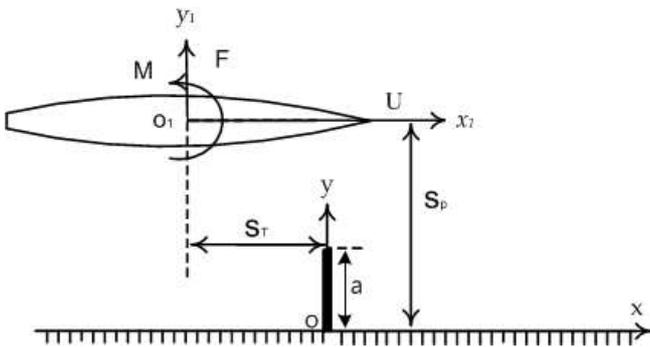


Fig. 1 Coordinate system

여기서, 조파의 영향을 무시하고, 수면을 강제벽으로 가정하며, 선체를 double body로 생각하면, 선체운동에 의한 선체 속도포텐셜 ϕ 는 다음의 연속의 조건을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z; t) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

또, 속도포텐셜 ϕ 는 다음의 경계조건을 만족해야 한다.

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \right]_C = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=\pm h} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \right]_B = U(t)(n_x) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\phi \rightarrow 0 \text{ at } \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \rightarrow \infty \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, B 는 선체 표면을 의미하고, h 는 수심을 의미하며, C 는 방과제형상을 하고 있는 측벽의 표면을 의미하고 있다. 또

한 \vec{n} 은 방과제형상을 하고 있는 측벽 표면에 대한 내측방향으로의 단위법선벡터를 나타내고 있고, n_x 는 항행선박의 선체표면에 대한 내측방향으로의 단위법선벡터 \vec{n} 의 x 축 방향성분을 나타내며, 무한원방에서의 유속이 제로인 조건은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 이와같이 설명한 경계조건을 만족하도록 속도포텐셜 ϕ 를 결정하면 좋으나, 완전하게 속도포텐셜을 구하기가 어렵기 때문에, 이 논문에서는 선체주위의 유동장을 내부영역과 외부영역의 두개의 영역으로 나누어서 문제를 간단하게 하고자 한다. 따라서 선체를 세장체(slender body)로 가정하고, slenderness parameter $\epsilon (\ll 1)$ 을 도입하며, 선체길이 L 에 비해서, 선폭 B , 흘수 d , 수심 h 는 slenderness parameter(ϵ)의 오더(order)라고 하고, 선체중심으로부터 방과제형상의 측벽까지의 횡방향거리 S_p 는 선체길이 L 과 같은 오더(order)라고 가정한다. 여기서, 선체고정좌표계에 있어서 다음과 같은 order로 되는 영역을 선박의 내부영역 (Inner region)으로 정의할 수 있고, 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1 = o(1), y_1 = z_1 = o(\epsilon) \quad \dots\dots\dots(6)$$

또한, 선체고정좌표계에 있어서 다음과 같은 order로 되는 영역을 외부영역으로 정의할 수 있고, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1 = y_1 = o(1), z_1 = o(\epsilon) \quad \dots\dots\dots(7)$$

결국, 앞에서 기술한 것처럼 문제를 간단하게 하기 위하여 선체 주위의 유동장을 내부영역과 외부영역의 2영역으로 나누고, 각각의 영역에 있어서 경계조건을 만족하는 2차원 속도포텐셜을 구한다. 또한 내부영역에서의 속도포텐셜의 외부극한(Outer limit)식과 외부영역에서의 속도포텐셜의 내부극한(Inner limit)식에 대해서 같은 성질을 가지는 항을 곱해 두고, Matching의 조건으로 해서 계산하면, vortex의 강도를 의미하고 있는 γ 에 관한 기본적분방정식이 다음과 같이 얻어진다(Kijima et al., 1987, 1991).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{C(x_1)} \int_{x_1}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) d\xi - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) \left[\frac{1}{x_1 - \xi} + \frac{\partial H^{(\gamma)}}{\partial y_1} \right] d\xi \\ & = -\frac{U}{2\pi H} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} S'(\xi) \frac{\partial H^{(\sigma)}}{\partial y_1} d\xi \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

식 (8)에서, $C(x_1)$ 은 blockage coefficient를 의미하고 있고, 이 값은 (Taylor, 1973)에 의해 구해진 단형단면에 대한 근사식을 이용한다. 또한 $H^{(\sigma)}, H^{(\gamma)}$ 는 각각 방과제형상을 하고

있는 측벽의 존재로 인하여 부가되는 함수를 의미하고, γ 는 vortex의 강도를 나타내고 있으며, 이 적분방정식을 γ 에 대해서 풀면 된다. 단, γ 에 관해서는 다음의 조건을 만족할 필요가 있다.

$$\gamma(x_1, t) = \gamma(x_1) \text{ for } x_1 < -\frac{L}{2},$$

$$\int_{-\infty}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) d\xi = 0, \gamma(x_1 = -\frac{L}{2}, t) = -\frac{1}{U} \frac{d\Gamma}{dt} \dots\dots(9)$$

단, Γ 는 방파제부근을 항행하는 선체주위의 순환을 나타낸다. 이상의 적분방정식을 푸는 것으로부터 와류분포가 구해지면, 베르누이 정리로부터 선체중심선상에 대한 압력차 ΔP 가 얻어지고, 아래 식으로부터 방파제형상을 하고 있는 측벽부근을 항행하는 선박에 작용하는 횡력 F 와 선박에 작용하는 모멘트 M 을 구할 수 있다.

$$F(t) = -h \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \Delta P(x_1, t) dx_1$$

$$M(t) = -h \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x_1 \Delta P(x_1, t) dx_1 \dots\dots\dots(10)$$

그리고, 수치계산에 의해 구해진 방파제형상의 측벽으로 인한 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 다음 식으로 무차원화 된다.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho L d U^2}, C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho L^2 d U^2} \dots\dots\dots(11)$$

3. 방파제부근을 항행하는 선박에 작용하는 유체력

이 장에서는 방파제 형상을 하고 있는 측벽부근을 대형선박이 항행하는 경우, 방파제로 인한 대형선박에 작용하는 유체력을 계산하였다. 이 논문에서 수치계산에 이용되고 있는 대상 선박은 Table 1에 표시한 바와 같이 VLCC로 하였고, 계산 조건은 방파제 a의 크기를 각각 0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L로 하였으며, 선속은 2knots로 계산하였다. 또한, 수심과 항행선박의 흘수의 비, h/d = 1.2에서부터 h/d=3.0까지 계산하였고, 방파제형상을 하고 있는 측벽으로부터 선박간의 횡방향거리를 파라메타로 하여 수치 계산하였다.

Table 1 Principal particulars

| | |
|------|--------|
| L(m) | 325m |
| B(m) | 53m |
| d(m) | 22.05m |

| | |
|-------------------|-------|
| Block coef. C_B | 0.831 |
|-------------------|-------|

Fig. 2 및 Fig. 3은 방파제형상을 하고 있는 측벽부근을 대형선박이 항행하는 경우, 측벽으로 인한 항행선박에 작용하는 유체력의 수치계산 결과를 보여주고 있다. 여기서, 수심 h와 선박의 흘수 d와의 비, h/d=1.3으로 하였고, 방파제 a의 크기는 각각 0.2L, 0.3L, 0.4L 및 0.5L로 가정하였으며, 선속은 2knots로 계산하였다. 또한 선체측면과 방파제형상을 하고 있는 연직구조물 끝단과의 횡방향거리는 6m로 계산하였다.

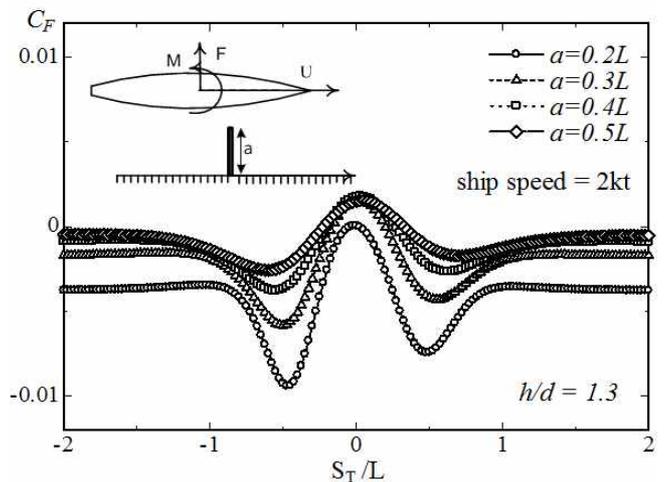


Fig. 2 Lateral force acting on a vessel in the proximity of breakwater

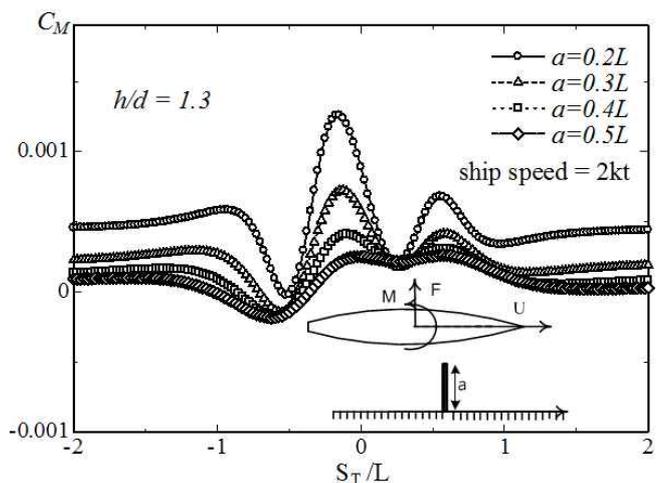


Fig. 3 Yaw moment acting on a vessel in the proximity of breakwater

Fig. 2에서 저속으로 항행하는 선박에 작용하는 횡방향 힘의 일반적인 경향은 다음과 같다. 방파제형상이 없는 측벽부근에서는 측벽과 선박의 횡방향거리에 따라 일정한 흡인력이

선체에 작용하고 있는 반면, 방파제형상이 있는 부근에서는 선체에 작용하는 유체력에 많은 변화가 있는 것을 알 수 있고, 이러한 현상은 방파제와 같은 측벽의 형상에 따라 선체에 작용하는 유체력의 특성이 달라질 것으로 보여진다. 그리고 이 논문에서 계산하고 있는 조건하에서는 방파제형상의 길이가 작아질수록 측벽과 방파제형상의 복합적인 영향으로 인하여 방파제부근에서의 선체에 미치는 유체력의 특성이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한, 방파제형상 전방에서 선체에 작용하고 있는 유체력과 방파제형상 후방에서 선체에 작용하고 있는 유체력의 특성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있고, 이러한 현상은 선박과 측벽과의 횡방향거리가 증가함에 따라 점차 약해지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 저속으로 항행하는 선박에 작용하는 선수동요 모멘트에 대한 경향을 보여주고 있다. Fig. 3의 경우, 방파제형상이 없는 측벽부근에서는 일정한 반발 모멘트(bow outward moment)가 선체에 작용하고 있는 반면, 방파제형상이 있는 부근에서는 선체에 작용하는 모멘트에 많은 변화가 있는 것을 알 수 있다. 그리고 이 논문에서 제안하고 있는 조건하에서는 Fig. 2와 마찬가지로, 방파제형상의 길이가 작아질수록 측벽과 방파제형상의 복합적인 영향으로 인하여 방파제부근에서의 선체에 미치는 모멘트의 특성이 크게 변화하면서 선체에 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한, 방파제형상 전방에서 선체에 작용하고 있는 모멘트와 방파제형상 후방에서 선체에 작용하고 있는 모멘트의 특성에 많은 변화가 있음을 알 수 있고, Fig. 2에서 설명한 바와 같이, 이러한 현상은 선박과 측벽과의 횡방향거리가 증가함에 따라 점차 약해지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 와 Fig. 5는 선박과 방파제형상을 하고 있는 측벽과의 횡방향거리를 파라메타로 하였을 때, 대형선박에 작용하는 유체력에 대한 수치계산 결과를 보여주고 있다. Fig. 4 및 Fig. 5에서 선박과 측벽과의 횡방향거리 S_p 는 각각 0.3L, 0.5L, 0.7L 및 0.9L로 가정하였고, 방파제의 길이 a 는 0.2L로 하였으며, 수심 h 와 선박의 흘수 d 와의 비, $h/d=1.2$ 로 하였고, 선속은 2knots로 계산하였다. 이 들 그림으로부터 알 수 있듯이, 방파제형상부근에서 선박에 작용하는 힘과 모멘트는 앞에서 설명한 내용과 같은 경향을 나타내고 있다. 한편, 이 논문에서 방파제형상 부근을 저속으로 항행하는 경우, 선박과 측벽과의 횡방향거리가 대략 0.7L 이상이 되었을 때 대형선박에 작용하는 방파제형상에 따른 힘과 모멘트는 거의 사라지는 것을 알 수 있고, 선박과 측벽과의 횡방향거리가 대략 0.9L 이상이 되었을 때, 방파제형상의 영향은 거의 사라지고, 측벽으로 인한 미소한 값이 대형선박에 작용하고 있음을 알 수 있다.

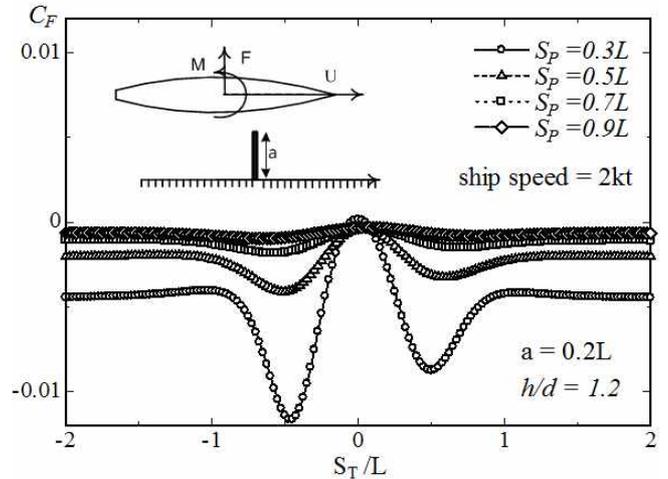


Fig. 4 The effect of lateral distance on lateral force acting on a vessel in the proximity of breakwater

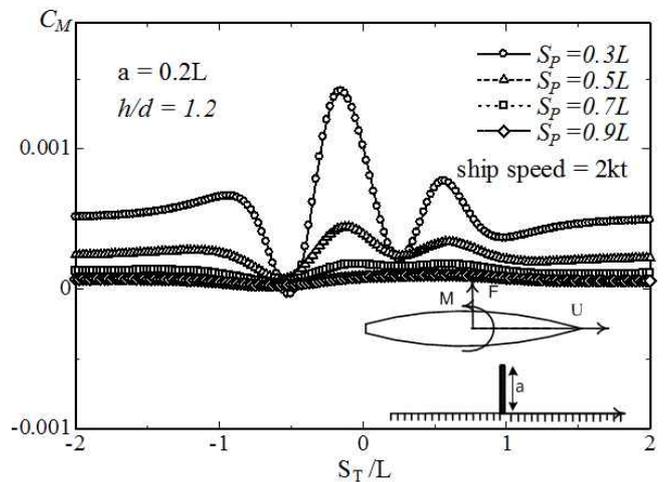


Fig. 5 The effect of lateral distance on yaw moment acting on a vessel in the proximity of breakwater

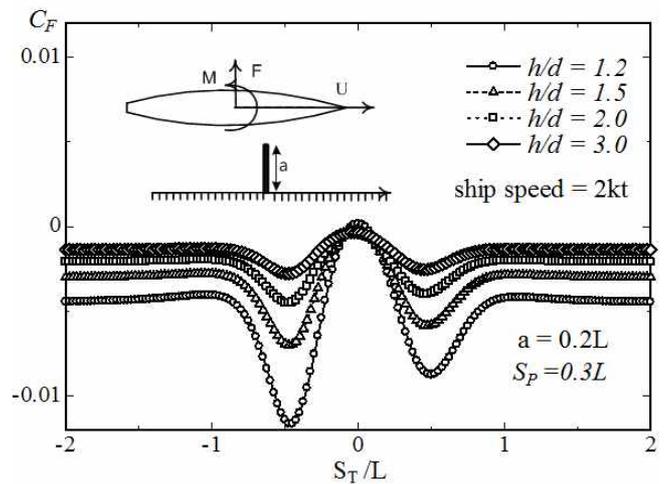


Fig. 6 The effect of h/d on lateral force acting on a vessel in the proximity of breakwater

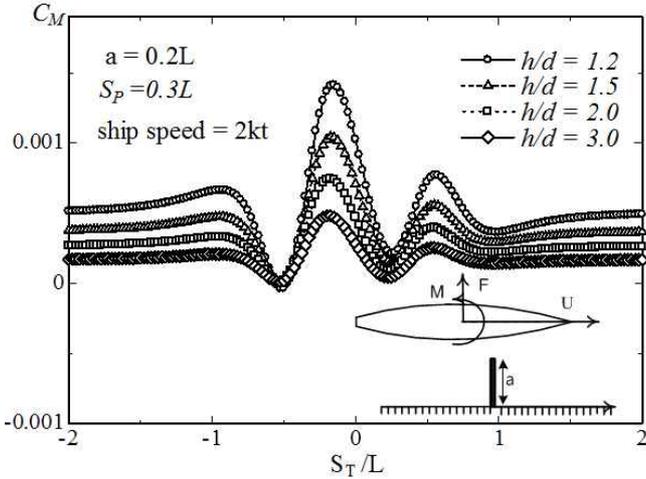


Fig. 7 The effect of h/d on yaw moment acting on a vessel in the proximity of breakwater

Fig. 6 및 Fig. 7은 수심 h 와 선박의 흘수 d 와의 비를 파라메타로 하였을 때, 대형선박에 작용하는 유체력에 대한 수치계산 결과를 보여주고 있다. Fig. 6 및 Fig. 7에서 선박과 측벽과의 횡방향거리 S_p 는 $0.3L$ 로 가정하였고, 방파제의 길이 a 는 $0.2L$ 로 하였으며, 수심 h 와 선박의 흘수 d 와의 비, $h/d = 1.2 \sim h/d = 3.0$ 으로 하였고, 선속은 2knots로 계산하였다. Fig. 6 및 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 방파제형상부근에서 선박에 작용하는 힘과 모멘트에 관한 일반적인 특성은 Fig. 2 및 Fig. 3에서 설명한 내용과 같은 경향을 보여주고 있다. 한편, 방파제형상 부근을 저속으로 항행하는 경우, 수심이 얕아질수록 방파제형상에 따른 선박에 작용하는 유체력의 변화가 급격하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

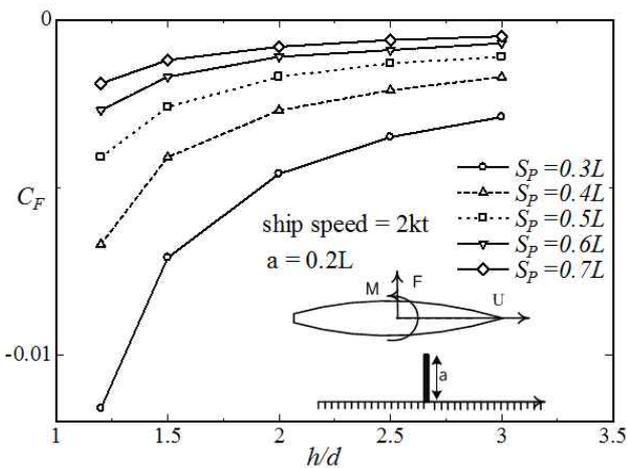


Fig. 8 The effect of h/d and S_p on maximum lateral force acting on a vessel in the proximity of breakwater

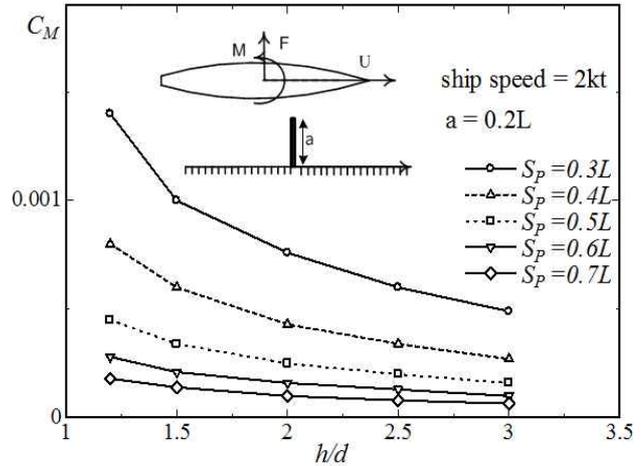


Fig. 9 The effect of h/d and S_p on maximum yaw moment acting on a vessel in the proximity of breakwater

또한, Fig. 8 및 Fig. 9는 수심 h 와 선박의 흘수 d 와의 비, 그리고 선박과 측벽과의 횡방향거리 S_p 를 파라메타로 하였을 때, 대형선박에 작용하는 유체력(peak)의 특성에 대한 수치계산 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 저속으로 항행하는 선박일지라도 h/d 의 값이 작아질수록, 또한 S_p 의 값이 작아질수록 대형선박에 작용하는 방파제의 영향이 급격하게 증가하는 것을 보여주고 있다. 한편, 이 논문의 경우, 선박과 측벽과의 횡방향거리가 대략 $0.5L$ 이상이 되었을 때, 수심에 따라 선박에 작용하는 방파제의 영향이 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 방파제형상을 하고 있는 측벽부근을 저속으로 항행하는 대형선박에 작용하는 측벽의 영향을 수치계산한 결과, 방파제가 있는 부근에서 선박에 작용하는 유체력이 상당히 크게 변화하고 있는 것을 알 수 있고, 이와 같은 측벽의 영향은 결국 대형선박의 조종운동에 상당히 크게 영향이 미칠 것이라고 판단된다. 따라서 대형선박이 이러한 방파제형상을 하고 있는 측벽부근을 항행할 경우, 해난 사고 방지를 위하여 본 연구에서 계산되어진 연구결과를 토대로 주의 깊게 항해를 해야 될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 저속으로 항행하는 대형선박이 방파제형상을 하고 있는 측벽 부근을 항행하는 경우, 측벽으로 인하여 대형선박에 작용하는 유체력을 계산하였고, 방파제의 길이, 수심과 선박흘수의 비 및 선박과 측벽과의 거리 등을 파라메타로 하였을 때의 대형선박에 미치는 측벽의 영향에 대하여 검토하였으며, 검토결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 이 논문의 조건하에서 방파제형상의 길이가 작아질수록 측벽과 방파제형상의 복합적인 영향으로 인하여 방파제

부근에서의 선박에 작용하는 유체력에 많은 변화가 있음을 알았다.

둘째, 방과제형상 구조물의 길이가 0.2L이고, 방과제형상 부근을 저속으로 항행하는 경우, S_p 가 대략 0.7L 이상이 되었을 때 방과제의 영향은 크게 약해지는 것을 알 수 있고, S_p 가 대략 0.9L 이상이 되었을 때 방과제형상의 영향은 거의 사라지고, 측벽으로 인한 미소한 값이 대형선박에 작용하고 있음을 알았다.

셋째, 방과제형상 부근을 저속으로 항행하는 경우, 수심 h와 선박의 흘수 d와의 비, h/d가 작아질수록 방과제형상에 따른 대형선박에 작용하는 유체력의 변화가 급격하게 일어나고 있음을 알았다.

넷째, 저속으로 항행할지라도 h/d의 값이 작아질수록, 그리고 선박과 측벽과의 횡방향거리가 작아질수록 대형선박에 미치는 방과제의 영향이 급격하게 증가하는 것을 알았다.

향후 연구과제로는 본 논문에서 가정하고 있는 형상을 포함한 여러 형상의 측벽에 대하여 수조실험을 통하여 검증할 필요가 있을 것으로 판단되고, 현재 이와 관련된 수조실험을 준비 중에 있다.

결론적으로, 협수로 혹은 천수로와 같은 제한수역에서 측벽 부근을 항행하는 선박의 경우, 선박조종운동의 관점에서 보았을 때 선속을 포함하여 선박과 측벽과의 종방향 및 횡방향 거리, 수심 등이 상당히 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하고 있는 계산 방법 및 결과는 제한수역에서의 안전 통항 및 충돌 회피를 위한 선박의 자동 제어 시스템과 해상교통 시스템 및 항만 건설 등을 위한 초기 설계 단계에서 상당히 유용할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013학년도 한국해양대학교 신진교수 정착 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Davis, A.M.J.(1986), "Hydrodynamic Effects of Fixed Obstacles on Ships in Shallow Water", Journal of Ship Research, Vol. 30, pp. 94-102.
- [2] Kijima, K. and Qing, H.(1987), "Manoeuvring Motion of a Ship in the Proximity of Bank Wall", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 162, pp. 125-132
- [3] Kijima, K., Furukawa, Y. and Qing, H.(1991), "The Interaction Effects between Two Ships in the Proximity of Bank Wall", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 81, pp. 101-112.
- [4] Taylor, P. J.(1973) "The Blockage Coefficient for Flow about an Arbitrary Body Immersed in a Channel", Journal of Ship Research, Vol. 17. pp. 97-105.
- [5] Yeung, R. W.(1978), "On the Interactions of Slender Ships in Shallow Water", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 85. pp. 143-159.
- [6] Yeung, R. W. and Tan, W. T.(1980), "Hydrodynamic Interactions of Ships with Fixed Obstacles", Journal of Ship Research, Vol. 24, pp. 50-59.

원고접수일 : 2013년 5월 14일
 심사완료일 : 2013년 5월 31일
 원고채택일 : 2013년 6월 12일