

低速 橫移動時 船體에 作用하는 流體力에 관한 研究

이 윤 석* · 김 순 갑**

Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Hull Under Lateral Low Speed Motion

Yun-Sok Lee* · Soon-Kap Kim**

Abstract

An accurate method of estimating ship maneuverability needs to be developed to evaluate precisely and improve the maneuverability of ships according to the water depth. In order to estimate maneuverability by a mathematical model, The hydrodynamic forces acting on a ship hull and the flow field around the ship in maneuvering motion need to be estimated.

The ship speed near the berth is very low and the fluid flow around a ship hull is unsteady. So, the transient fluid motion should be considered to estimate the drag force acting on the ship hull.

In the low speed and short time lateral motion, the vorticity is created by the body and grow up in the acceleration stage and the velocity induced by the vorticity affect to the body in deceleration stage. For this kind of problem, CFD is considered as a good tool to understand the phenomena.

In this paper, the 2D CFD code is used for basic consideration of the phenomena to solve the flow in the cross section of the ship considering the ship is slender and the water depth is large enough. The flow fields Added and hydrodynamic forces for the some prescribed motions are computed and compared with the preliminary experiment results. The comparison of the force with measurement is shown a fairly good agreement in tendency.

* 한국해양대학교 해사수송학과 석사과정 산업공학전공

** 한국해양대학교 해사수송과학부 교수

The 3D Potential Calculation based on the Hess & Smith Theory is employed to predict the surge, sway added mass and yaw added moment of inertia of hydrodynamic coefficients for M/V ESSO OSAKA according to the water depth. The results are also compared with experimental data. Finally, the sway added mass of hydrodynamic coefficients for T/S HANNARA is suggested in each water depth.

1. 서 론

항만내에서의 선박의 횡이동 운동은 저속 항행시 주로 이루어지며 특히 예인선에 의한 접·이안시의 조선(操船)은 비교적 짧은 거리를 매우 저속으로 행하기 때문에 실제 선박의 이동 거리 또한 짧은 범위내에서 이루어진다. 이와 같은 운동에 대한 유체력 파악에는 과도기적(過渡期)인 유체력을 고려한 실험유체역학(EFD: Experimental Fluid Dynamics)적인 방법이 널리 이용되고 있으며, 물리 실험에서 얻은 데이터를 분석하여 가·감속시(加·減速時)의 과도기적인 유체력에 관한 모델식이나 평균 횡력(橫力) 계수 등을 제안하고 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. 현재 예인선에 필요 되어지는 소요마력 산출이나 예인선을 이용하는 조종 시뮬레이터 등에서는 준정상(準定常)이라는 가정 하에 정상 상태에서 얻은 횡력 계수를 이용하거나 이러한 계수들을 수정하여 이용하고 있으나, 운동의 이력(履歷)에 관한 양적인 영향은 그다지 고려하지 않고 있는 실정이다.

본 논문은 실험적인 방법(EFD)으로는 가·감속도의 설정 및 정확한 유체력의 측정이 곤란함으로 수치유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)과 3차원 포텐셜 계산(3 Dimension Potential Calculation)을 이용하여 저속 횡이동시 선체에 작용하는 유체력 및 선체 주위의 유동장을 파악하고자 한다. 최근 CFD기법을 이용하여 조종 유체력 계산에 응용된 연구가 있지만^{(4),(5)} 본 논문과 같이 부가질량이 크고, 박리와(剝離渦)의 발달 단계에 있는 운동의 계산이나, 물리 실험에서 행한 선체 횡이동을 직접 CFD의 운동에 대응시키는 등과 같은 내용은 찾아 볼 수 없다. 또한 복잡한 비정상(非定常)운동⁽⁶⁾인 급출발, 등가속도, 이동 중의 진동 등과 같은 운동을 대상으로 한 수치계산 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구는 이러한 현황을 바탕으로 한 기초적 제1단계 연구로서 2차원 CFD를 이용하여 횡방향으로 이동하는 선체 단면내의 흐름을 파악하는 기법을 개발하였으며 또한 3차원 포텐셜 계산을 수행하여 정도 높은 부가질량을 산출하였다.

2. 계산 대상 및 비교 실험

2.1 계산 대상

선체의 횡이동을 고려할 경우 선박의 폭을 기준으로 한 Fn수(Froude Number)는 일반적으로 매우 작은 값으로 예를 들면, 선체 폭이 30m인 선박을 0.3m/s로 이동시킬 경우 Fn수는 0.016 정도에 해당된다. 이와 같은 운동에 대한 물리 실험으로 소형모형(小型模型)을 사용할 경우 물체의 이동 속도가 매우 작음으로 인해 정확한 계측이 곤란하며, 저속으로 수면관통형(水面貫通型) 모형을 수조(水槽)시험으로 행할 경우 수조 표면의 오염으로 인해 표면장력의 영향을 받게 된다. 따라서, CFD 계산 및 수조 실험은 $Fn = 0$ 으로 상정(想定)한 2중모형(二重模型)을 선택하였으며, 침수 영역에 대한 세장선(細長船)의 단면내 흐름을 고려하여 2차원 계산을 수행하였다. 또한 실험과 같은 정도의 Rn수(Reynolds Number)를 고려하여 계산상에서는 난류(亂流) 모델을 사용하지 않고 층류(層流) 계산을 행하였고, 계산 대상으로는 Fig.1과 같은 기하형상이 비교적 간단한 직각 2등변 3각형의 2중모형을 취하였다. 단면의 형상은 정방형 단면으로 단면으로부터 박리점(剝離點)이 2곳인 매우 단순한 형상을 이용하였다.

계산에 이용한 운동에는 정가속도(定加速度) 실험에 모의(模擬)한 것으로 물체를 정지 상태로부터 가속도 운동, 등속도 운동, 감속도 운동을 하게 하여 정지시키는 운동을 고려했다.

2.2 비교 실험의 원리 및 방법

2.2.1 실험의 원리

횡이동시 선체에 작용하는 유체력 F는 가속도에 의한 관성력 성분과 속도에 의존하는 저항 성분과의 합으로 구성되며, 저항 성분은 일반적으로 속도의 2승에 비례하므로 전체 유체력 F는 다음과 같은 식으로 추정할 수 있다.

$$F = (m + m_y) a + \frac{1}{2} \rho S_w V^2 C$$

여기서, m : 공기중의 선체질량 m_y : 선체 부가질량
 a : 가속도 ρ : 밀도 C : 저항 계수
 V : 선체 이동속도 S_w : 선체의 침수 면적

예인전차를 속도(V)와 가속도(a)로 이동시켜 모형에 작용하는 유체력(F)을 계측한다.

2.2.2 공시(供試) 모형

본 연구에 사용한 모형의 형상은 Fig. 2와 같이 정방형의 한 변이 0.1m, 스패ن(Span)의 길이가 1m인 알루미늄 각(角) 파이프로 2차원 특성을 높이기 위하여 직경 0.4m, 두께 5mm인 원판을 부착한 후 원판의 좌·우 외측에 폭 0.05m, 두께 5mm인 알루미늄 지지대의 외곽 모서리를 둥글게 하여 접합하였다. 또한 2개의 알루미늄 지지대를 1개의 구형재(溝型材)에 결합하여 6분력계(分力計:日章電氣株式會社制-방수형)에 연결하였다.

2.2.3 실험 방법

본 비교 실험은 고베상선대학(神戸商船大學)의 수조 실험실에서 행하였으며, 수조의 제원은 길이 60m, 폭 6m, 깊이 2m이다. 6분력계를 예인전차에 부착하여 모형이 예인전차 방향에 정횡이 되도록 한 후, 수조의 길이 방향으로 정지상태에서부터 지정한 가속도로 가속시켜 설정한 속도에 도달하면 일정속도로 이동시킨 후, 지정한 감속도로 감속하여 정지하는 실험을 실시하였다.

속도는 예인전차의 출력 속도를 계측하였고, 이동 거리는 예인전차의 이동 변위를 초음파변위계(超音波變位計)로 계측하였으며, 물체의 질량을 포함한 전체 유체력을 검력계(檢力計)로 계측하여 AD변환기(Analog-Digital Converter)를 통해 기록했다.

2.3 실험 결과

정가속도 실험 결과 중에서 설정 속도가 각각 0.1, 0.2m/s인 것을 일례로서 Fig. 3에 시계열(時系列)로 제시하며, 두 실험 결과가 거의 같은 경향을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에 제시한 실험 결과는 설정 속도는 각기 다르지만 무차원 가속도가 0.987로 같은 것으로 무차원 가속도가 본 연구에 있어 중요한 변수로서 작용하고 있음을 추측할 수 있다.

시계열에 따른 유체력은 가속도가 시작되는 시점에서 부가질량에 상당하는 유체력이 나타나며, 가속도가 진행됨에 따라 이러한 성분은 점점 증가하다가 가속도 운동이 끝나는 시점에서 급격히 떨어져 일정 속도로 이동하는 부분에서는 저항 성분의 유체력만이 존재함을 알 수 있다.

등속도 운동이 끝나고 감속도 운동을 시작하는 부분에서 다시 부가질량에 해당되는 유체력 성분이 나타나고 감속도가 진행됨에 따라 차츰 증가하다가 감속도 운동이 종료되는 직후에 급격히 감소함을 볼 수 있다.

감속도 운동이 종료되고 정지 운동 상태의 유체력은 물체가 완전히 정지한 상태임에도 불구하고 일정 시간 동안 계속적으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 실험 결과는

2.2.1절에서 추정된 이론식이 타당함을 잘 검증해 주고 있으며, 실제 접·이안하는 선박의 경우에도 선체를 예인선이 일정 가속도로 밀다가 예선을 정지할 경우 선체는 관성력에 의해 계속압박 방향으로 이동하게 되며 이러한 현상이 물리 실험에서도 계속 되었다고 할 수 있다.

3. 2차원 CFD 계산 및 실험과의 비교 검토

계산 대상에 대한 단면내의 흐름을 파악하기 위해 2차원 CFD 기법을 이용한 점성류(粘性流)의 계산을 수행한 후 CFD 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 분석하고자 한다.

3.1 CFD 계산 개요

2차원 비압축성 유체의 기본 방정식은 운동량 보존의 법칙인 Navier-Stokes 방정식(N-S 방정식)과 질량보존의 법칙인 연속방정식이다. 본 연구에는 2차원 비압축성 유체의 기초 방정식을 물체와 함께 이동하는 비관성계 좌표로 변환하여 계산을 수행하였다. 또한, 대표 속도(U_∞)와 물체의 폭(B)을 기준으로 무차원 하였다.

계산에 이용한 좌표계로는 Fig. 1과 같이 2중모형의 수선면에 x축을 취해 이동 방향과 반대 방향의 x축을 +로 하였고, 원점은 이동 방향을 기준으로 앞쪽에 설정하였다. y축은 연직상방을 +로 했고 좌표의 길이는 폭(B)로 무차원하기 때문에 뒷부분이 1이 된다.

u, v 를 이동 좌표계의 x, y 축 방향의 유속이라 하면, 무차원화 한 지배방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Rn} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{dU_0}{dt}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Rn} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

여기서, $\frac{dU_0}{dt}$: 무차원 가속도, U_0 : 무차원 이동속도

$$Rn = \frac{U_\infty B}{\nu} \text{ 레이놀즈수, } \nu: \text{ 동점성 계수}$$

상기의 식을 물체적합좌표계(物體適合座標系)로 변환하기 위해 독립 변수인 ξ, η 을 이용하여 부분변환(속도 성분은 원래의 좌표계를 이용)하면 다음과 같이 표현되며 격

자의 형성은 타원형 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + A \frac{\partial u}{\partial \xi} + B \frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{1}{Rn} \left(g^{11} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + g^{22} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) - S_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + A \frac{\partial v}{\partial \xi} + B \frac{\partial v}{\partial \eta} = \frac{1}{Rn} \left(g^{11} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + g^{22} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) - S_v$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} = 0$$

여기서,

$$A = \left(u \frac{b_1^1}{J} + v \frac{b_2^1}{J} \right) - \frac{1}{Rn} f^1, \quad B = \left(u \frac{b_1^2}{J} + v \frac{b_2^2}{J} \right) - \frac{1}{Rn} f^2$$

$$S_u = \frac{\partial p}{\partial \xi} \frac{b_1^1}{J} + \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{b_1^2}{J} - \frac{2}{Rn} g^{12} u_{;\eta}, \quad f^1 = \frac{(Jg^{11})_{;\xi} + (Jg^{12})_{;\eta}}{J}$$

$$f^2 = \frac{(Jg^{12})_{;\xi} + (Jg^{22})_{;\eta}}{J}, \quad g^{11} = \frac{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2}{J^2}$$

$$g^{22} = \frac{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}{J^2}, \quad g^{12} = -\frac{x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta}}{J^2}$$

$$b_1^1 = J \xi_x = y_{\eta}, \quad b_2^1 = J \xi_y = -x_{\eta}$$

$$b_1^2 = J \eta_x = -y_{\xi}, \quad b_2^2 = J \eta_y = x_{\xi}$$

상기 식의 이산화(離散化)에 대해서는 이동 격자계를 이용하였으며, 이러한 좌표계는 변형하는 익형(翼型) 주위의 흐름을 해석한 연구와 동일한 것으로⁽⁷⁾, 시간에 대해서는 1차 후진 차분법, 공간 방향에 대해서는 Chen과 Patel⁽⁸⁾의 Finite-Analytic (FA) 법을 이용하였다.

속도와 압력과의 결합은 SIMPLER⁽⁹⁾ 알고리즘(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation)을 이용하였다. 따라서, 단위시간 스텝을 풀기 위해서는 많은 수의 반복 계산이 수행되어야 하며, FA법의 계수는 매 반복시 마다 새롭게 갱신되도록 했다. 단위 시간 스텝의 반복 계산이 종료되는 수렴(收斂)조건은 $\max |P_{k+1, i, j} - P_{k, i, j}| < 10^{-6}$ 로 했다.

무차원 가속도 항목은 현재 시간 스텝의 무차원 가속도와 전 단계 시간 스텝의 무차원 가속도를 이용하여 근사(近似)한 1차 후진 차분법에 의해 이산화했다.

계산에 사용된 경계조건은 다음과 같다.

유입 경계(流入境界) : $u=U_0, v=0, p=0$

측방 경계(側方境界) : $u=U_0, p=0$

하류 경계(下流境界) : 포물형 근사(方物型近似)

물체 표면(物體表面) : $u=0, v=0$, 근사적(近似的) $\partial p / \partial x = \partial U_0 / \partial t$

3.1.1 계산 격자 및 계산 조건

본 연구에서는 물체 근방의 압력이 크게 변화하지 않는 범위내에서 계산이 수행되도록 x 의 계산 영역을 6~7, y 의 범위를 -6~6까지 설정하였다. 실험과 비교를 위한 계산을 제외하고는 $Rn=10^5$ 로 계산하였다. 격자점 수는 x 방향으로 150개, y 방향으로 80개, 최소 격자의 간격은 0.0015이고 시간 간격은 0.004이며 무차원 단위 시간 1은 250 스텝으로 하여 계산을 수행하였다. 이와 같은 계산 조건은 본 연구와 가장 근사한 어형(魚形) 주위의 난류 계산을 행한 연구⁽⁸⁾를 바탕으로 하여 선정하였다.

3.2 CFD 계산 결과에 대한 유체력의 분석

무차원 가속도를 0.5, 1.0, 2.0으로 변화시킬 경우에 상응하는 계산 결과를 Fig. 4에 시계열로 나타낸다. 계산 결과에는 실험에서 계측되어지는 모형의 질량에 해당되는 유체력이 배제된 순수한 유체력만을 나타낸 것이다. Fig. 4는 예인선 2척에 의해 선박이 예인되어 지는 상태를 모의한 것으로 정예인력시험(定曳引力試驗)에서 계측한 무차원 가속도 1 정도에 상응하는 값을 대입하여 얻은 결과이다⁽¹¹⁾. 가는 선은 운동을 나타내며, 굵은 선은 유체력을 의미한다. 모든 경우의 계산 결과에서 공통적으로 나타나는 특징으로는 초기의 시간 스텝에서 유체력이 급격히 증가하고 있으며, 이러한 증가량은 가속도의 크기에 비례하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 급격히 증가된 유체력은 점점 가속도가 진행됨에 따라 증가 추세를 보이다가 속도가 일정하게 되는 순간(가속도가 0이 되는 시점)에 최초 시간 스텝의 유체력과 같은 양 만큼 급격히 떨어지며, 이러한 급격한 변화량은 참고 문헌⁽¹¹⁾의 부가질량과 일치하며 그 값은 다음과 같다.

$$X_a = \frac{F_a}{\rho U^2 B} = \frac{0.76 \rho \pi a^2 \frac{U_0^2 dU_0}{B dt}}{\rho U^2 B} = 0.597 \frac{dU_0}{dt} \quad (2a = B)$$

여기서, X_a : 무차원 부가질량, F_a : 유차원 부가질량

또한, 포텐셜 계산을 CFD 계산 모델에 적용하여 부가질량을 산출하여 보면 그 값이 0.597(무차원 가속도가 1 인 경우)로 CFD 계산결과와 정확히 일치하고 있다. 박리와가 거의 없는 $t=0.004$ 의 경우(가속도 운동을 시작한 직후)에 대한 CFD 계산과 포텐셜 계산에 의한 압력 분포를 Fig. 5에 나타내며 또한 동일한 부가질량(가속도 운동의 종료 직후)과 비교하기 위해 CFD 계산상에서 $t=1.0$ 의 압력에서 $t=1.004$ 의 압력을 뺀 압력

분포를 추가한다. Fig. 5에 알 수 있듯이 3가지 경우가 모두 잘 일치하고 있으며, 이와 같은 결과로부터 부가질량은 와도의 영향이 적다는 사실을 확인할 수 있다. 다시 말하면, 유체력 성분 중에서 부가질량에 관한 성분은 와도 운동이 없는 포텐셜 계산에 의해 산출이 가능함을 시사하고 있다.

Fig. 6에서는 $t=0.004$ 인 경우에 대하여 2차원 CFD의 계산에 의한 표면 압력과 실험에 사용한 모형의 단면을 2차원 포텐셜 계산으로 수행한 표면 압력 및 실험 모형을 대상으로 3차원 포텐셜 계산으로 수행하여 얻은 모형의 중앙 단면에 대한 표면 압력을 비교한 것으로 삼자가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 가속도 성분에 의한 유체력인 부가질량은 무차원 가속도에 의해 그 값의 크기가 다르며, 가속도 개시 직후와 가속도 종료 직후 또는 감속도 개시 직후와 감속도 종료 직후에는 무차원 가속도가 같은 경우 같은 값을 나타내고 있다.

CFD 계산 결과를 제시한 Fig. 7에는 가속도 운동이 종료되어 속도가 일정하게 되는 시점에서 저항 성분의 유체력은 무차원 가속도에 상관없이 최대치를 나타내다가 점점 감소하여 일정치에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 정상상태로 보여지는 부분의 저항치와 등속도 운동이 시작되는 부분의 저항치는 적지 않는 차가 나타나며, 이러한 원인은 등속도 운동이 시작되는 시점에서(가속도 운동이 종료되는 시점) 과도기적인 유체력이 작용하기 때문이라 판단된다.

정상 상태로 보여지는 부분의 저항치는 池田⁽¹²⁾등과 定兼⁽¹⁾ 등이 주장하는 이동거리의 증가와 함께 단순히 감소한다는 결과와는 다소 상이한 결과를 나타내고 있으나, Sarpkaya⁽⁶⁾의 급출발과 같은 결과와는 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8에 횡축에 물체의 이동 거리(S)를 취하고 종축에는 CFD 계산 결과인 유체력을 제시한다. 속도가 일정한 부분에서는 거의 같은 곡선을 나타내고 있어 실험 결과와 대체적으로 같은 양상을 보이고 있으나, 등속도가 처음으로 시작되는 시점에서는 무차원 가속도가 다르므로 인해 약간 다르게 나타나고 있다. 이와 같은 원인은 이동 거리에 대한 시간은 같아도 이동 속도가 다르므로 인해 박리와의 크기가 서로 상이하기 때문이라고 사료된다.

3.3 CFD 계산 결과와 실험 결과와의 비교 분석

실험에 의하여 얻은 결과에는 물체의 질량이 포함된 유체력이 계측되는 반면 CFD 계산 결과에는 물체의 질량에 해당되는 유체력이 배제된 것임으로 실험 결과와 계산 결과의 비교를 위해 CFD 계산 결과에 물체의 질량에 상응하는 유체력을 추가하도록 한다. CFD 계산에서는 무차원화 한 값들을 이용했기 때문에 실험에서 사용한 물체의 질량을 다음과 같이 무차원화 한다.

$$\frac{m \alpha}{\rho U_{\infty}^2 BS} = \frac{m \frac{U_{\infty}^2 dU_0}{Bdt}}{\rho U_{\infty}^2 BS} = \frac{m}{\rho B^2 S} \frac{dU_0}{dt}$$

여기서, S : 스패의 길이, m : 모형의 질량 11.85 Kg

실험 데이터를 기초로 하여 가·감속도 운동에 대해서는 1차 직선,가속도에서 등속도, 또는 등속도에서 감속도로 진입하는 부분은 2차 곡선으로 근사시켜 전반적으로 실험 상태의 운동과 거의 같은 조건이 되도록 CFD 계산상의 운동을 수정 보완하여 수행한 계산 결과와 실험 결과의 비교를 Fig. 9에 제시한다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 운동 개시부터 가속도 운동을 거쳐 일정 속도에 이르는 단계까지는 수치 계산 결과와 실험 결과가 거의 같은 경향을 나타내고 있어 CFD 계산에 의해 얻은 유체력의 타당성과 수치 계산의 정확성을 보여 주고 있다. 그러나, 정지 후의 유체력은 유체력의 감쇄에 있어 계산 결과가 실험치 보다 빠르게 나타나고 있다. 이러한 원인은 계산 전 영역을 저(低) Rn수를 이용한 층류 계산을 수행했기 때문이며 또한, Rn수의 설정에 있어서 속도가 일정하게 되었을 때의 속도를 기준으로 전 영역에 걸쳐 같은 Rn수를 적용하였기 때문이라 사료된다.

2차원 CFD 계산은 Tempest 3(Alpha 21164A CPU 633MHz)을 이용하였으며, 본 계산에 이용한 압력의 수축 조건은 10^{-6} 으로 1 Step의 반복 계산 수는 약 3000회 정도로, 무차원 시간 6초(6t)를 계산하는 데 소요된 총 시간은 대략 50시간 정도이다.

4. 부가질량 및 3차원 포텐셜 계산 개요

제 3 장에서 언급한 바와 같이 저속 횡운동시 선체에 작용하는 유체력은 가속도항에 의한 부가질량과 운동 속도에 비례하는 저항 성분으로 크게 분류할 수 있다. 부가질량은 선박 조종성 뿐만 아니라 선체 운동론 등에서도 매우 중요한 유체력 성분으로 본 장에서는 조종성능에서 사용하는 부가질량을 3차원 포텐셜 이론에 의해 산출하고자 한다.

4.1 부가질량에 관한 개요

선체가 유체 중에서 운동 할 경우 유체에 의해서 여러 가지 저항을 받게 되며, 이러한 유체의 저항 성분 중에서 선체의 가속도에 의해 기인되는 유체력을 부가질량이라 정의한다. 공기 중에서의 부가질량은 공기의 밀도가 작기 때문에 그다지 크게 작용하지 않으나, 선박과 같이 물체가 수중에 잠겨있는 경우에는 유체의 밀도에 의해 매우

현저한 값을 나타내게 된다. 또한 동일한 선박일지라도 선체의 운동 방향, 가속도의 크기, 수심이나 항행 구역 등에 따라서도 부가질량은 각기 다른 값을 나타낸다.

선체 운동에 기인하는 실질적인 부가질량을 산출하기 위해서는 실제 복잡한 선체 형상이나 유동장의 변화 등이 고려되어야 한다. 이와 같은 내용을 고려할 때 실험적인 방법에 의한 부가질량 산출이 바람직하다고 할 수 있지만, 현실상 실험에 소요되는 경비나 시간 등에 대한 많은 문제점들을 수반하고 있다. 실험적인 방법에 의해 구해진 元良 차트 또한 널리 이용되고는 있으나 실험에 이용된 선형(線型)이 한정되어 있어 최근에 건조된 선박에 대해서는 적용하기 어려운 실정이다.

이러한 실정들을 고려하여 볼 때 복잡한 선체의 형상이나 제반 환경적인 요소(수심, 항행 구역) 등이 고려 가능한 정도 높은 수치계산 방법이 바람직하다고 사료된다.

4.2 3차원 포텐셜 계산 개요

3차원 포텐셜 계산을 수행하기 위해 제 3 장의 2차원 CFD 계산을 3차원으로 확장하여 선체 이동 좌표계를 취한 후 Navier-Stokes 방정식에서 점성항을 무시하면 다음과 같다. 선박이 x 축 방향(Surge 운동)으로 운동하는 경우만을 일례(一例)로서 기술하도록 한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{dU_0}{dt}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

상기의 방정식을 이용하여 와도가 없는 비회전 운동에 대해 속도 포텐셜(Φ)을 정의하여 연속방정식에 대입하면 Laplace 방정식이 성립한다.

경계 조건으로는 선체 표면의 법선 방향 속도가 0라는 점과 무한 원방(無限遠方)에서의 속도가 초기 조건과 같다는 것으로 이러한 경계조건과 속도 포텐셜을 이용하여 압력방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + p - \frac{dU_0}{dt} x = \text{Constan}$$

속도 포텐셜(Φ)은 선형(線形) 이론임으로 무한 원방의 일양류와 일양류중에 위치한 선체로 인해 기인되는 단위 교란(攪亂) 포텐셜(ϕ)을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Surge (x축 방향 - 종운동)} \quad \Phi = U_0(x + \phi)$$

상기의 식과 무한 원방에서 $p=0, \phi=0$ 라는 조건을 고려하여 무차원 압력방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$p = -\frac{\rho U_0}{2} \phi + \frac{1}{2} U_0^2 \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

선체에 작용하는 압력을 구하기 위해서는 압력방정식에서 미지수인 교란 포텐셜(ϕ)을 구하는 문제가 중요한 과제이며, 이러한 교란 포텐셜(ϕ)은 Laplace 방정식을 만족하는 함수로 본 연구에서는 Hess & Smith⁽¹⁰⁾에 의한 특이점 분포법(Singularity Distribution)을 이용하였다.

5. 3차원 포텐셜 계산에 의한 부가질량의 산출

5.1 회전 타원체에 대한 부가질량의 계산 및 결과

회전 타원체의 부가질량에 대해서는 정확한 이론치⁽⁶⁾⁽¹³⁾가 알려져 있으므로 3차원 포텐셜 계산을 회전 타원체에 적용하여 이론치와 포텐셜 계산치의 비교 검토를 행한다. 계산에 사용한 타원체는 선체의 형상과 가장 근사한 모형(Tanker 선형)을 고려해 타원체의 장축의 길이를 2a, 단축의 길이를 2b로 가정할 경우 장축/단축의 비가 6인 경우를 대표적으로 계산하였다.

타원의 형상을 나타내기 위해 이용한 패널 수에 따른 계산의 정확도를 파악하기 위하여 장축을 20개와 30개로 분할할 경우(일반적으로 선박의 선도에 기입된 단면이 20 - 30개인 점을 감안하여 선정하였다)와 각각의 장축의 대해 단축을 10, 20, 40, 60, 80으로 분할할 경우에 대해 부가질량을 산출하였다.

Fig. 10에 포텐셜 계산에 의해 구한 부가질량을 이론치와 비교하여 제시하며, 단축의 분할 수가 40개 이상의 경우 이론치와 거의 일치하고 있어 3차원 포텐셜 계산에 의한 부가질량의 산출이 타당함을 잘 입증하고 있다.

5.2 포텐셜 계산에 의한 실선의 부가질량 산출

회전 타원체에 대한 포텐셜 계산 결과를 기초로 포텐셜 계산을 실선에 적용하여 부가질량을 산출한다. 적용 대상 선박으로는 일본 조종성능 위원회의 공시(公試) 모델

선박인 ESSO OSAKA호와 본 대학의 실습선인 T/S HANNARA호를 대상으로 하였다.

ESSO OSAKA호에 대해서는 조종성능에 대한 많은 실험 결과가 공개되어 있기 때문에 포텐셜 계산에 의한 부가질량과 실험치와 비교가 가능하며, 이러한 비교 검토를 토대로 T/S HANNARA호의 횡이동(Sway)에 관한 부가질량을 제안하고자 한다.

5.2.1 ESSO OSAKA호의 부가질량

대상선인 ESSO OSAKA호는 길이×폭×만재 흘수×방형 계수가 343.0×53.0×22.05×0.8306인 탱커 선형이며 선체의 형상을 가급적 충실히 표현하도록 했으며 계산에 이용한 단면의 분할 수는 40개이다. 이중선체에 대한 포텐셜 계산에는 수면상부와 수면하부가 xy단면에 대해 대칭이며, 보통 선박의 경우 좌·우 대칭임을 고려하여 선체 형상에 대한 입력 자료는 수면하부 반쪽 부분만을 이용하였다. 또한, 수심의 변화에 따른 부가질량을 산출하기 위하여 수심(H)과 흘수(d)의 비(H/d)를 변수로 xy면이 균일한(z 일정) 수저면을 설정하여 포텐셜 계산에 추가하였다. 수저면에도 선체와 마찬가지로 일정 수의 패널을 분포시키며 패널의 범위는 선체에 의한 영향이 거의 무시될 수 있는 범위를 선정하였다. 수심의 변화에 따른 부가질량을 산출함에 있어서 설정한 수심과 흘수의 비(H/d)는 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0로 하여 각각의 경우에 대한 포텐셜 계산을 수행하였다.

계산상에는 수선간장(Lpp) 길이를 기준으로 선박의 폭(B)과 흘수(d)를 무차원화 하였고, 선박의 질량(m), Surge 운동시의 부가질량(m_x), Sway 운동시의 부가질량(m_y), z 축 중심의 관성 모멘트(i_{zz}), Yawing 운동에 대한 부가 관성 모멘트(I_{zz}) 등에 대한 무차원화는 다음과 같다.

$$m', m'_x, m'_y \square m, m_x, m_y \square \frac{1}{2} \rho L^2 d$$

$$I'_{zz}, i'_{zz} \square I_{zz}, i_{zz} \square \frac{1}{2} \rho L^4 d$$

상기의 위 첨자는 무차원화 한 값을 나타내며, 무차원화 한 부가질량 계수(K_x, K_y) 및 부가 관성모멘트 계수(K_z)는 다음과 같이 표현된다.

$$K_x \square m'_x / m' \square K_y = m'_y / m'$$

$$K_z \square I'_{zz} / i'_{zz} \square$$

H/d의 변화에 따른 부가질량 계수를 표현하는 방법으로는 H/d의 변화에 의한 특정 수심에서의 부가질량 계수(K_{xH}, K_{yH}) 및 부가 관성모멘트 계수(K_{zH})를 심수 영역에서

의 부가질량 계수($K_{x\omega}$, $K_{y\omega}$) 및 부가 관성모멘트 계수($K_{z\omega}$)로 나눈 값을 이용하였다. H/d의 변화에 따른 부가질량 계수(M_x , M_y) 및 부가 관성모멘트 계수(M_z)는 다음과 같은 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} M_x &\equiv K_{xH} / K_{x\omega} = m'_{xH} / m'_{x\omega} \\ M_y &= K_{yH} / K_{y\omega} = m'_{yH} / m'_{y\omega} \\ M_z &\equiv K_{zH} / K_{z\omega} \equiv I'_{zH} / I'_{z\omega} \end{aligned}$$

부가질량에 대한 실험치와 포텐셜 계산 결과의 비교를 Fig. 11에 제시한다. Fig. 11에는 H/d에 따른 M_x , M_y , M_z 값을 나타낸 것으로 실험치와 계산치의 상대 비교를 행한 것이다. M_x 를 제외한 M_x , M_z 값은 조금 상이한 결과를 나타내고 있으나 H/d에 따른 경향은 실험치와 일치하고 있음을 알 수 있다.

포텐셜 계산 이외의 방법(유한 요소법)을 통해 부가질량을 산출하여 실험치와 비교한 연구⁽¹⁷⁾ 등과 대조하여 보면, 본 연구에서 이용한 포텐셜 계산 방법이 다른 방법에 비해 비교적 실험치에 가까운 값을 나타내고 있어 본 연구의 신뢰성 및 효율성이 있다고 사료된다.

5.2.2 T/S HANNARA호의 부가질량

ESSO OSAKA호의 실험 결과와 포텐셜 계산 결과의 비교 분석을 통해 확인할 수 있듯이 Sway 운동에 대해서는 타당한 결과가 도출된 반면, Surge 운동에 관한 부가질량 및 Yawing 운동시의 부가 관성모멘트에 대해서는 좀더 사려 깊은 검토가 요구됨으로 T/S HANNARA호에 대해서는 선박의 횡이동(Sway 운동)에 관한 부가질량만을 대상으로 하여 산출하고자 한다.

본 대학의 실습선인 T/S HANNARA호의 횡이동에 대한 부가질량을 산출하기 위하여 T/S HANNARA호의 Body Plan 및 Offset에서 얻은 데이터를 토대로 각 단면을 3차원 스플라인 곡선(Spline Curve) 근사시켜 계산에 필요한 입력 데이터를 작성하였다.

Fig. 12에 H/d에 따른 M_y 값을 나타낸 것으로 M_y 의 값은 ESSO OSAKA호에 비해 전수 영역에서 비교적 큰 값을 나타내며, 이는 선형의 변화에 따른 것으로 추정된다.

T/S HANNARA호에 대한 부가질량에 대해서는 계산 결과와 비교 분석할 만한 자료가 없으나, 방형 계수(C_b)가 동일한 선박에 대한 실험 데이터⁽¹⁴⁾인 元良 차트와 비교하여 볼 때 타당한 계산 결과가 산출되었다고 사료된다.

6. 결 론

2차원 CFD 계산과 3차원 포텐셜 계산을 이용하여 선체 횡이동시에 작용하는 유체력에 관한 본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같은 몇 가지의 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 선체 횡이동시에 관한 단면내의 흐름을 파악하는 방법을 개발하였으며, 간단한 모델을 선정하여 적용한 후 계산 결과와 실험치의 비교 분석을 행하였다.
- 2) 본 연구에 이용된 모델에 대한 결과로서 계산상에 이용된 무차원 가속도의 범위내에서는 비정상(非正常) 부가질량에 대한 압력 분포 및 유체력은 박리와의 영향을 받지 않으며, 점성 유체력에 대해서는 Sarpkaya(7)의 실험 결과에 근사함을 알 수 있었다.
- 3) 실험(EFD)과 수치계산(CFD)의 비교를 통해 수치 계산법의 타당성을 입증하였으며, 급격한 유동장의 변화 등에도 수치 계산이 적용 가능함을 확인하였다.
- 4) Hess & Smith법을 기초로 3차원 포텐셜 계산법에 의한 부가질량 및 부가 관성모멘트를 산출하는 방법을 개발하여, 회전 타원체와 ESSO OSAKA호에 적용한 후 실험 결과와의 비교 분석을 통해 포텐셜 계산의 타당성을 검증하였다.
- 5) T/S HANNARA호의 횡이동에 관한 부가질량을 수심의 변화에 따라 산출하여 제안하였다.

향후 과제로서는 난류(亂流) 모델을 도입하여 천수 영역에서도 적용할 수 있는 3차원 CFD 계산법이 요구되며, 포텐셜 계산을 여러 가지 선형에 대해 적용하여 선형에 따른 부가질량의 모델화와 함께 비교적 간단하면서 실용적인 부가질량 계산법의 개발이 요구된다.

상기와 같은 결과가 선박의 초기 설계 단계에 기초 자료로서 활용됨과 동시에 선박의 운항자에게 선박의 횡이동시 수반되는 각종 물리적 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 定兼廣行・鶴田廣巳: 停止から横移動を開始する船體に働く過渡的流體力,日本航海學會論文集 90號, pp 273~279, 1993.
- [2] 定兼廣行: 停止から横移動を開始する船體の横力係數に關する檢討, 日本航海學會論文集 95號, pp 193~200, 1996.
- [3] 定兼廣行・戸田保幸・丹臧善治: 減速横移動する船體の平均横力係數, 日本航海學會論文集 98號, pp 277~284, 1998.
- [4] 和泉一裕・佐藤徹・宮田秀明: CFDによる肥大船の操縦運動シミュレーション, 日本造船學會論文集 第184號, pp 55~62, 1998.
- [5] 野中莞二・牧野雅彦・吉野良技: 操縦運動時の船體まわりの流場に關する研究, 船舶技術研究所報告 第34卷 第5號, 平成9年.
- [6] T. Sarpkaya and M. Isaacson: Mechanics of Wave Force on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Co., 1981.
- [7] T. Nakaoka and Y. Toda: Laminar Flow Computation around Fish Like Motion Wing, Proc. of Inter. Offshore and Polar Eng. Conference, Osaka, Japan, Vol. 3, pp 530~580, 1994.
- [8] H. C. Chen and V. C. Patel: Laminar Flow at the Trailing Edge of a Flat Plate, AIAA Journal, Vol. 25, pp 920~928, 1987.
- [9] Masuko A. Ogiwara S. : Numerical Simulation of Viscous Flow around Practical Hull Form, INC 5, Hiroshima, Sep., 1989.
- [10] Hess J. L. and Smith A. M. O: Calculation of Non Lifting Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Bodies, Douglas Aircraft Co. Inc. Report, 1962.
- [11] 丹臧善治: 減速横移動する船體の平均横力係數と附加質量係數に關する 模型實驗, 神戸商船大學 碩士論文, 1998.
- [12] 池田良穂・阪本榮二・田中紀男 : 停止から運動を開始する肥大物體に働く粘性流體力の性質について, 關西造船協會誌 第210號, pp 55~60, 1988.
- [13] S. H. Lamb and M. A. : Hydrodynamic, Sixth Edition, Cambridge University Press, 1963.
- [14] 元良誠三・小山健夫・藤野正隆・前田久明: 船體と海洋構造物の運動學, 成山堂, 1982.

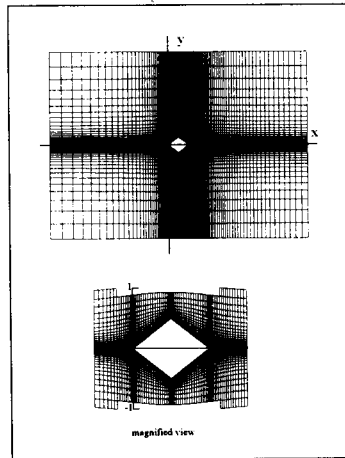


Fig. 1 The Configuration of Computational Grid

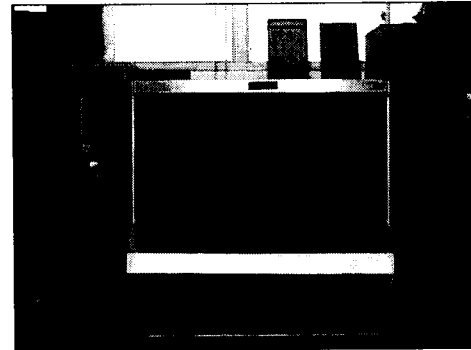


Fig. 2 Front View of a Experimental Model

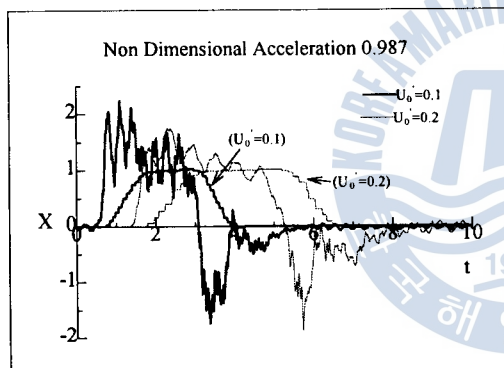


Fig. 3 The Time History of the Body and Measured Force

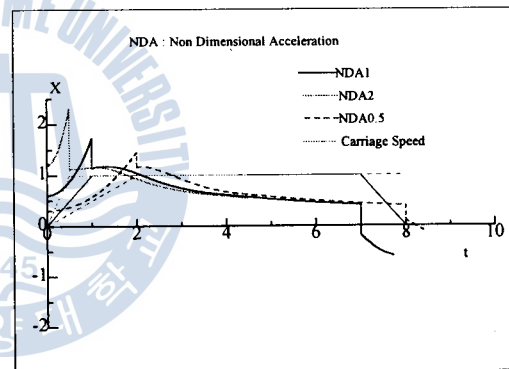


Fig. 4 Computed Hydrodynamic Force

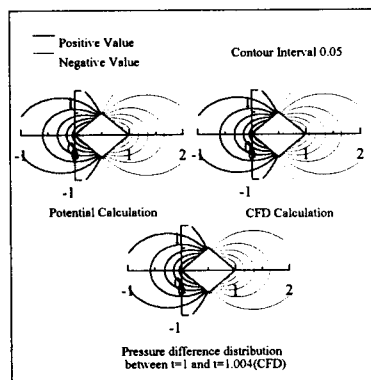
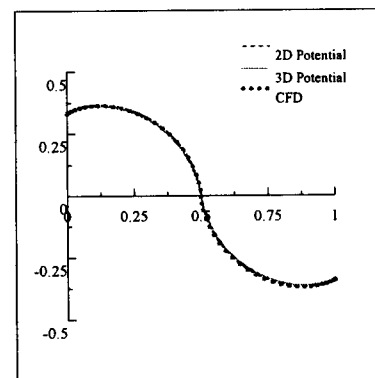
Fig. 5 Comparison of Pressure Distribution($t=0.004$)

Fig. 6 Comparison of Surface Pressure Distribution

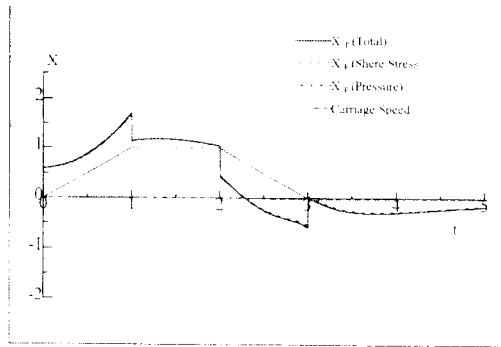


Fig. 7 Hydrodynamic Force with Time Step

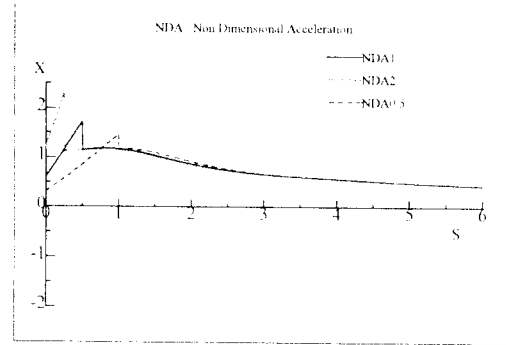


Fig. 8 Hydrodynamic Force with Moving Distance

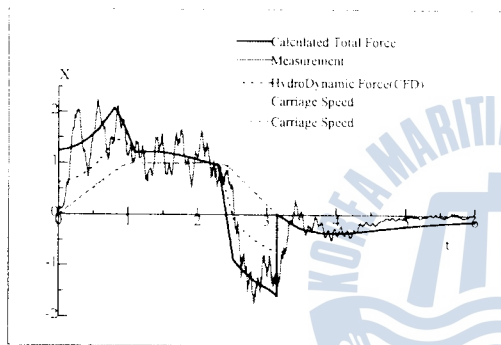


Fig. 9 Comparison of the Force with Measurement
(Non Dimensional Acceleration 1.0)

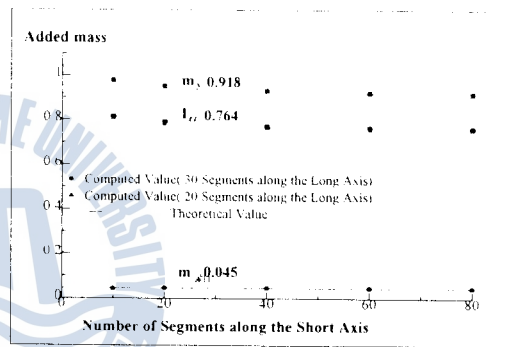


Fig. 10 Shape of Ellipsoid for Computation and Comparison of Added mass and Added moment of Inertia

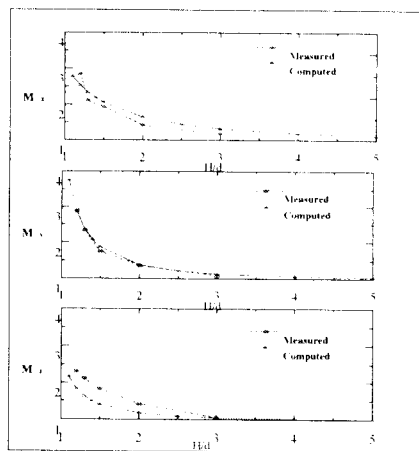


Fig. 11 Comparison of Added mass and Added moment of Inertia Coefficients for ESSO OSAKA

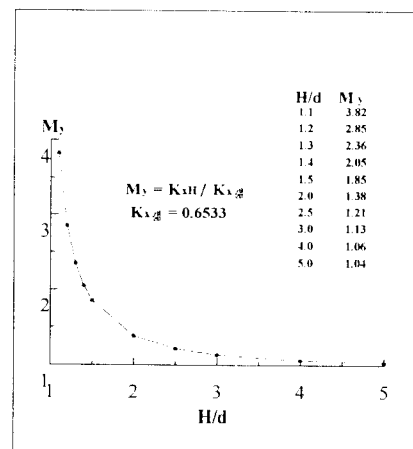


Fig. 12 Hydrodynamic Coefficients of Sway Added mass for T/S HANNARA

