

DỰ ĐOÁN LỰC CẢN CHO MÔ HÌNH TÀU KVLCC2 SỬ DỤNG
PHẦN MỀM STAR-CCM+

PREDICTION OF KVLCC2 RESISTANCE USING STAR-CCM+

Nguyễn Thị Hà Phương, Nguyễn Thị Hải Hà

Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam; phuongnth.dt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt - Trong bài báo này, nhóm tác giả dự đoán lực cản cho mô hình tàu chở dầu KVLCC2 khi chuyển động đều trên nước tĩnh bằng phương pháp số (CFD) với sự trợ giúp của phần mềm STAR-CCM+. Trường dòng chảy bao quanh thân tàu được mô phỏng sử dụng phương trình Navier–Stokes với số Reynolds trung bình (RANSE). Mô hình vật lý được sử dụng là thể tích chất lỏng (VOF) và mô hình dòng rối k-ε. Ảnh hưởng của lưới đến kết quả mô phỏng được phân tích dựa trên việc lựa chọn các lưới với độ mịn khác nhau; Lực cản tổng của tàu được so sánh với kết quả thử mô hình trong bể thử được công bố. Với sai số nhỏ hơn 3%, kết quả thu được cho thấy độ tin cậy cao của phần mềm STAR-CCM+ cũng như phương pháp số trong bài toán mô phỏng tính toán lực cản tàu trên nước tĩnh.

Từ khóa - Lực cản tàu thủy; RANSE; động lực học tàu thủy; Phương pháp số (CFD); nước tĩnh

Abstract - In this paper, the authors focus on predicting ship resistance of tanker model KVLCC2 in calm water by CFD method using software STAR-CCM+. The flow around the ship is simulated using RANSE. The physics model - Volume of Fluid (VOF) and k-ε turbulent model are set; The effects of grids on simulation result are analysed based on choosing different grids; The numerical total resistance of vessel is compared with available experimental result. With the deviation of total drag around 3%, the result shows a high accuracy of this software as well as numerical method in the field of simulating ship resistance in calm water.

Key words - Ship resistance; Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANSE); ship hydrodynamics; Computational Fluid Dynamics (CFD); calm water

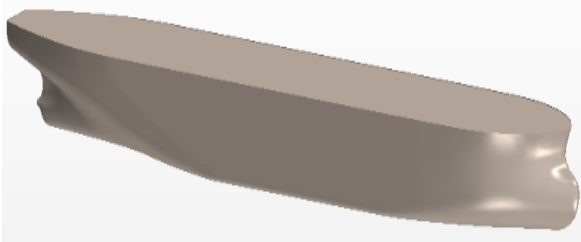
1. Giới thiệu

Trong thiết kế tàu thủy, việc dự đoán lực cản cho tàu đóng vai trò vô cùng quan trọng vì nó liên quan đến việc lựa chọn động cơ sao cho tàu được thiết kế đạt được vận tốc theo yêu cầu của chủ tàu. Ở giai đoạn thiết kế ban đầu, tính toán lực cản chính xác cho phép các nhà thiết kế dự đoán được công suất của máy chính, từ đó lên phương án lựa chọn động cơ sao cho phù hợp.

Có nhiều phương pháp để tính toán lực cản tàu, bên cạnh phương pháp lý thuyết sử dụng các công thức kinh nghiệm đã được các nhà nghiên cứu đưa ra từ rất lâu và phương pháp thử nghiệm mô hình trong bể thử, CFD ngày nay càng được áp dụng rộng rãi. Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các phần mềm CFD, hiện nay phương pháp số có thể được coi là sự lựa chọn ít tốn kém nhất về chi phí cũng như thời gian trong khi vẫn đảm bảo được độ chính xác phù hợp. Phương pháp tiếp cận RANSE (hay Phương trình Navier–Stokes với số Reynolds trung bình) được sử dụng phổ biến để tính toán dòng chảy nhớt trong thiết kế tàu, nhưng mức độ chính xác của những dự đoán này và mức độ mà chúng phụ thuộc vào mô hình dòng rối vẫn đang được nghiên cứu bởi các nhà khoa học. So với các nước trên thế giới, những nghiên cứu mô phỏng lực cản bằng phương pháp số hiện nay ở nước ta vẫn còn hạn chế, chưa khai thác được nhiều phần mềm CFD. Bên cạnh một số phần mềm mô phỏng CFD thông dụng như Ansys Fluent hay Open Foam, STAR-CCM+ cũng là một phần mềm thương mại được sử dụng rộng rãi cho ra kết quả mô phỏng với độ tin cậy cao đối với bài toán lực cản. Vì vậy, trong bài báo này tác giả tiến hành dự đoán lực cản cho mô hình tàu chở dầu KVLCC2 khi chuyển động đều trên nước tĩnh sử dụng phần mềm STAR-CCM+.

2. Thông số mô hình tàu

Tàu KVLCC2 được thiết kế tại Viện Nghiên cứu Tàu và Công trình ngoài khơi Hàn Quốc (Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering, nay là MOERI) vào năm 1997 với mục đích thử nghiệm CFD [1]. Để thuận tiện cho việc so sánh với kết quả thử mô hình, tàu được sử dụng trong bài báo này là tàu chở dầu KVLCC2 với tỷ lệ thu nhỏ 1:58 (Hình 1) [2]. Các thông số kích thước của tàu KVLCC2 được đưa ra trong Bảng 1.



Hình 1. Mô hình tàu KVLCC2

Bảng 1. Thông số chủ yếu của tàu

Thông số	Tàu mẫu	Mô hình (1:58)
Chiều dài giữa hai đường vuông góc (L_{PP}) (m)	320,0	5,5172
Chiều rộng (B) (m)	58,0	1,0
Chiều chìm (D) (m)	30,0	0,5172
Mớn nước (T) (m)	20,8	0,3586
Vận tốc thiết kế (V) (m/s)	7,974	1,047
Số Froude (Fn)	0,142	0,142
Diện tích mặt ướt (m ²)	27194	8,0838
Thể tích chiếm nước (m ³)	312621	1,6023
Hệ số béo (C _B)	0,8098	0,8098

3. Cơ sở lý thuyết

Trường dòng chảy bao quanh thân tàu được mô tả bằng hai phương trình cơ bản: Phương trình liên tục (1) và phương trình Navier–Stokes (2).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Trong đó:

$\nu = \mu / \rho$ – độ nhớt động học của chất lỏng;

u, v, w – vận tốc của các hạt chất lỏng theo thời gian t ;
 p – áp suất.

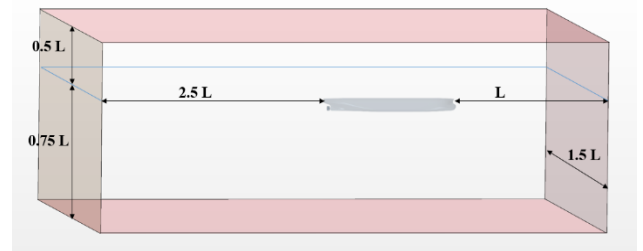
Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp tiếp cận RANSE hay được gọi là phương trình Navier–Stokes với số Reynolds trung bình. Đây là một trong những phương pháp được sử dụng rộng rãi để tính toán mô phỏng dòng rối. Phương trình Navier–Stokes với số Reynolds trung bình (RANSE) là phương trình chuyển động của dòng chất lỏng tính trung bình theo thời gian. Như đã biết, bản chất của động lực học chất lỏng tính toán là giải các phương trình chuyển động của chất lỏng với các điều kiện biên cho trước. Dòng chảy bao quanh thân tàu chính là các phương trình bảo toàn khối lượng, mô men và năng lượng, được biết đến là các phương trình Navier–Stokes. Các phương trình Navier - Stokes mô tả chính xác dòng chảy bằng cách giả sử rằng chất lỏng hoạt động như một quá trình liên tục chứ không phải là các phân tử rời rạc. Việc phân tách các phương trình Navier–Stokes thành các phương trình RANS cho phép mô phỏng các dòng chảy giống với trong thực tế [3]. Trong phương pháp RANSE, dòng chảy được giả thiết là không nén và ba thành phần vận tốc có thể được biểu diễn như vận tốc rối dao động nhanh quanh một vận tốc trung bình chậm (6 thành phần ứng suất Reynolds). Quá trình này mô tả sự tăng lên của vận tốc chất lỏng do sự xuất hiện của các xoáy nước [4]. Giả thiết này làm đơn giản hóa phương trình Navier–Stokes và phương trình nhận được gọi là phương trình Navier–Stokes với số Reynolds trung bình. Hiện nay, kỹ thuật RANSE được sử dụng rộng rãi để giải quyết các bài toán động lực học chất lỏng, cụ thể là dự đoán lực cản tàu thủy, mô phỏng sự tương tác giữa chong chóng và thân tàu và các bài toán liên quan thuộc các lĩnh vực khác.

Trong bài toán này, các phương trình RANSE được giải sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn. Đây là một trong những phương pháp được sử dụng để giải các phương trình đạo hàm riêng và được ứng dụng nhiều trong các bài toán động lực học chất lỏng. Bản chất của phương pháp này là rời rạc hóa các phương trình đạo hàm riêng phức tạp, đưa chúng về dạng các phương trình đại số có dạng đơn giản hơn. Phương pháp này phân chia một miền chất lỏng thành các phần tử thể tích riêng biệt (phần tử lưới), sau đó giải phương trình RANS và các định luật bảo toàn trong mỗi phần tử lưới. Độ chính xác của mô

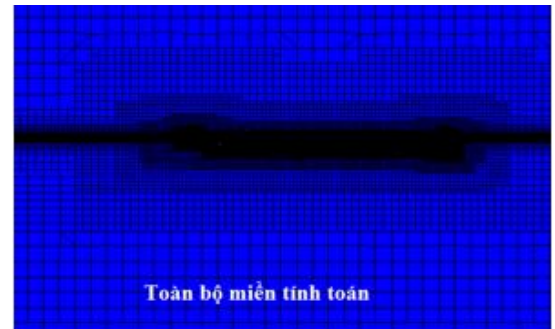
phỏng chủ yếu được xác định bởi lưới được chia và mô hình dòng rối [3].

4. Thiết lập mô phỏng lực cản trên nước tĩnh

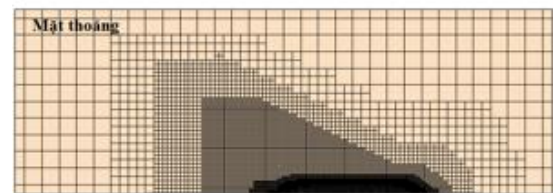
Tính toán lực cản của mô hình tàu KVLCC2 được thực hiện bằng phần mềm STAR-CCM+ tại vận tốc $V = 1,047$ (m/s) tương ứng với số Froude $Fr = 0,142$. Vì mô hình tàu có hình dạng đối xứng qua mặt phẳng dọc tâm nên chỉ mô phỏng một nửa thân tàu để giảm thời gian tính toán. Bề thử ảo được thiết lập có kích thước đủ rộng để tránh được phản xạ của nước từ thành bể tác động đến mô hình tàu làm ảnh hưởng đến kết quả tính toán (Hình 2). Kích thước của bề thử ảo được lấy phụ thuộc vào chiều dài mô hình tàu, trường hợp này bề thử ảo có kích thước là 2,5 L tính từ đuôi về cuối thành bể, L tính từ mũi về đầu thành bể, 0,5 L tính từ mặt thoáng đến mặt bể, 0,75 L tính từ mặt thoáng đến đáy bể và 1,5 L là chiều rộng nửa bể.



Hình 2. Kích thước của bề thử ảo



a) Toàn bộ miền tính toán



b) Mặt thoáng



c) Thân tàu

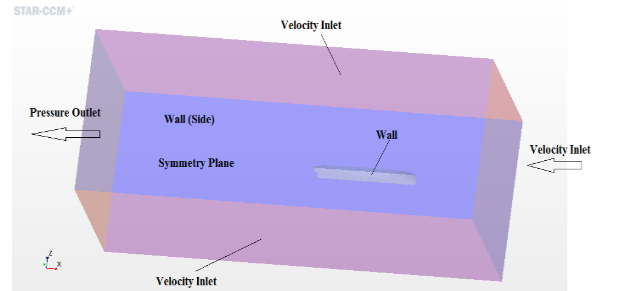
Hình 3. Thiết lập lưới tại các khu vực khác nhau

Đối với bài toán mô phỏng tàu trên nước tĩnh, lựa chọn các loại lưới sau: Lưới bề mặt (surface mesh) được sử

dùng để chia bề mặt thân tàu thành các bề mặt hữu hạn; Lưới khối (volume mesh) được sử dụng để chia miền chất lỏng tính toán thành các phần tử thể tích hữu hạn; Lưới lăng trụ (prism layer) là lưới dạng khối được sử dụng ở bề mặt tiếp giáp với bề mặt thân tàu để giải dòng chảy nhớt bao quanh thân tàu. Khi thiết lập các thông số lưới, chia lưới mịn hơn ở những khu vực cần thiết để giảm số lượng lưới, từ đó giảm thời gian tính toán. Đối với bài toán dự đoán lực cản, cần tăng số lượng lưới ở khu vực mũi, đuôi tàu và một số khu vực bao quanh thân tàu để bắt được hình ảnh dòng chảy rõ hơn và thu được kết quả lực cản chính xác hơn (Hình 3). Phân tích độ hội tụ lưới được thực hiện bằng cách thiết lập 3 loại lưới: Lưới thô (427796 phần tử lưới), lưới trung bình (840650 phần tử lưới), lưới mịn (1185415 phần tử lưới). Dạng biên thiết lập cho các thành của bể thử ảo và bề mặt bao quanh mô hình tàu được mô tả trong Hình 4 và Bảng 2.

Bảng 2. Dạng biên cho các biên trong miền tính toán

Tên biên	Dạng biên
Inlet (Dòng chảy vào)	Velocity Inlet (Vận tốc vào)
Outlet (Dòng chảy ra)	Pressure Outlet (Áp suất ra)
Side (Cạnh bể)	Symmetry Plane (Mặt phẳng đối xứng)
Symmetry (Mặt phẳng đối xứng)	Symmetry Plane (Mặt phẳng đối xứng)
Top (Thành trên)	Velocity Inlet (Vận tốc vào)
Bottom (Đáy bể)	Velocity Inlet (Vận tốc vào)
Thân tàu (boong, thân, đuôi)	Wall (Tường)



Hình 4. Thiết lập dạng biên cho các biên trong miền tính toán

Để mô phỏng lực cản, nhóm tác giả sử dụng mô hình vật lý nhiều pha là thể tích chất lỏng (VOF). Đây là mô hình được sử dụng để giải quyết các bài toán hai hoặc nhiều pha. Cụ thể, trong bài toán lực cản cần thiết lập hai pha: Nước và không khí. Ngoài ra, ở đây lựa chọn mô hình dòng rối cho phương trình RANSE là mô hình k-ε, một mô hình dòng rối được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng phương pháp số vì tính hội tụ nhanh và không cần nhiều bộ nhớ máy tính. Trong bài toán mô phỏng trường dòng chảy bao quanh thân tàu, mô hình k-ε cho ra kết quả dự đoán tốt hơn các mô hình dòng rối khác.

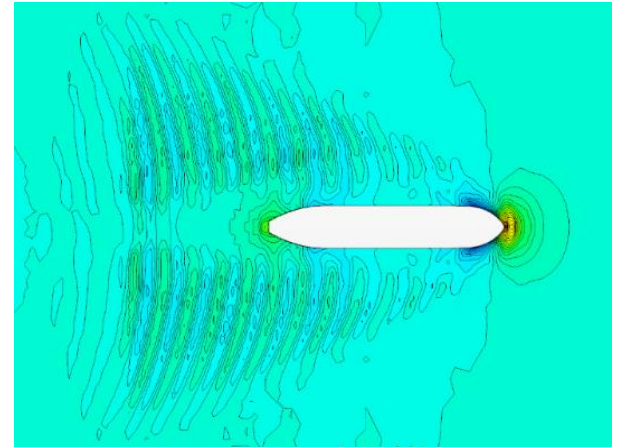
Một yếu tố quan trọng quyết định độ chính xác của kết quả mô phỏng số là bước thời gian tính toán. Theo khuyến cáo của Tổ chức bể thử quốc tế (ITTC) [5], với mô hình dòng rối k-ε bước thời gian được xác định theo công thức:

$$\Delta t = 0,005 \sim 0,01L / V \tag{3}$$

Trong đó, L – chiều dài của mô hình (m); V – vận tốc mô hình (m/s); Δt – bước thời gian (s). Theo đó, bước thời gian được lựa chọn trong bài thử này là 0,04 s.

5. Kết quả và thảo luận

Sau khi thiết lập các thông số và tiến hành chạy mô phỏng, trên phần mềm STAR-CCM+ có thể quan sát được hình ảnh trực quan của vết Kelvin trên mặt thoáng tự do (Hình 5). Có thể thấy, hình ảnh thu được từ mô phỏng là hoàn toàn phù hợp với hình ảnh thực tế. Điều này chứng tỏ kết quả lực cản thu được là có độ tin cậy cao.



Hình 5. Vết Kelvin của tàu KVLC2 tại vận tốc $Fr = 0,142$

Để thu được giá trị lực cản với độ chính xác cao hơn cần kiểm tra độ hội tụ lưới. Kết quả lực cản với sự kiểm tra độ hội tụ lưới được đưa ra trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả tính lực cản tại vận tốc $Fr = 0,142$

Loại lưới	Số phần tử lưới, phần tử	Lực cản tổng, $R_T(N)$
Lưới thô	427796	20,645
Lưới trung bình	840650	20,242
Lưới mịn	1185415	20,240

Với mỗi loại lưới khác nhau được thiết lập, lực cản thu được là khác nhau. Thực tế cho thấy, lưới càng mịn thì giá trị lực cản càng chính xác. Tuy nhiên, độ hội tụ lưới được xác định khi đến một độ mịn nhất định, giá trị lực cản không thay đổi. Việc lựa chọn số lượng phần tử lưới phù hợp làm tăng độ tin cậy của kết quả mô phỏng đồng thời giảm tối đa thời gian tính toán. Từ kết quả thu được, có thể thấy lưới phù hợp trong trường hợp này là lưới trung bình với 840650 phần tử, tương ứng với lực cản tổng $R_T = 20,242 (N)$.

Bảng 4. So sánh kết quả tính sức cản theo CFD và kết quả thử mô hình

Dại lượng	Giá trị
Vận tốc, V (m/s)	1,047
Lực cản tổng theo CFD, $R_T (N)$	20,242
Lực cản tổng theo thử nghiệm mô hình, $R_T (N)$	19,710
Sai số (%)	2,66

Để kiểm tra độ chính xác của kết quả mô phỏng, lực cản của mô hình thu được bằng phần mềm STAR-CCM+ được so sánh với kết quả thử nghiệm mô hình tại bể thử đã

được công bố [6]. Kết quả cho thấy sai số giữa hai phương pháp là không đáng kể (2,66 %). So sánh kết quả dự đoán sức cản theo CFD và kết quả thử mô hình được trình bày trong Bảng 4.

6. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã dự đoán thành công lực cản cho mô hình tàu KVLCC2 sử dụng phần mềm STAR-CCM+. Việc áp dụng phương trình RANSE kết hợp với mô hình dòng rối k- ϵ cho hình ảnh trường dòng chảy phù hợp thực tế. Kết quả mô phỏng lực cản bằng phương pháp số không lệch nhiều so với kết quả thử nghiệm mô hình với sai số dưới 3%. Qua đó, khẳng định độ tin cậy của phần mềm STAR-CCM+ trong việc ứng dụng mô phỏng các bài toán thủy động lực học tàu thủy. Tuy nhiên, bài báo này chỉ mang tính chất giới thiệu và ứng dụng phần mềm STAR-CCM+ vào dự đoán lực cản cho một mô hình tàu chưa gắn chong chóng ở một giá trị vận tốc nhất định.

Hướng phát triển của nghiên cứu trong thời gian tới là ứng dụng các phần mềm CFD vào bài toán mô phỏng trường dòng chảy sau thân tàu ở tàu có gắn chong chóng đối với các mô hình tàu khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Larsson, L., et al., *Numerical ship hydrodynamics: an assessment of the Gothenburg 2010 workshop*, Springer, 2013.
- [2] http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html
- [3] Molland, A. F., et al., *Ship resistance and propulsion*, Cambridge university press, 2017.
- [4] Larsson, L. and H. Raven, *Ship resistance and flow (Principles of naval architecture series)*, Alexandria, VA: SNAME, 2010.
- [5] ITTC, R. P. and R. Procedures, *Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications*, ITTC Report 7: 02-03, 2011.
- [6] Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, D.H., "Measurement of flows around modern commercial ship models", *Exp. in Fluids*, Vol. 31, 2001, pp 567-578.
- [7] Userguide STAR-CCM+ Version 12.0.2, CD-Adapco.

(BBT nhận bài: 19/6/2020, hoàn tất thủ tục phản biện: 24/9/2020)