

Reynolds 수가 다른 컨테이너선 모형 주위의 유동 계산

김병남*, 박종환**, 김우전*

목포대학교 기계·선박해양공학부 선박해양시스템전공*

Calculation of Flows around Container Ship Models with Different Reynolds Numbers

Byoung-Nam Kim*, Jong-Hwan Park** and Wu-Joan Kim*

Department of Naval Architecture and Marine Eng., Mokpo National University*

Abstract

CFD calculations are performed for KRISO 3600TEU container ship(KCS) models with different Reynolds numbers. Numerical calculations of the turbulent flows with the free surface around KCS have been carried out at $Re=0.791 \times 10^6$ and $Re=1.4 \times 10^7$ using a standard Fluent package. In both cases, Froude number is fixed with 0.26 and wave elevation is simulated by using the VOF method. The calculated results at $Re=1.4 \times 10^7$ and $Re=0.791 \times 10^6$ are compared with the experiment data of KRISO towing tank test and RIMS CWC test, respectively. Boundary layer thickness and wake field shows Reynolds number differences. There are some changes in wave pattern behind transom stern.

※ Keywords: CFD(전산유체역학), Container ship(컨테이너선), Reynolds number(Reynolds 수), Viscous flow(점성유동), Free surface(자유수면), Stern flow(선미유동)

1. 서언

선박의 저항성능을 평가하기 위해서는 예인수조에서 모형시험(model test)을 수행하는 것이 보통이다. 하지만 예인수조 모형시험의 경우 비용과 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 다양한 선형 변환을 통한 성능개선을 수행하기 어렵다.

한편 회류수조를 이용하여 비교적 적은 비용으

로 다양한 모형선을 제작하고 성능평가를 통하여 최적 선형을 개발하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 하지만 회류수조 시험의 경우 모형선의 크기가 작고, 정량적인 결과 해석에 제약이 있는 약점이 있다. 최근에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)기법을 이용하여 짧은 시간에 저렴한 비용으로 선형을 평가하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 CFD 해석 결과가 상대적인 비교에는 유용하나, 정확한 유효마력의 추정에는 아직도 부족한 점이 있다. 그리하여 실적선의 경우에는 유효마력의 추정을 위해 최종적으로 예인수

조 모형시험을 수행하게 된다.

소요시간과 비용 측면에서 유리한 CFD 기법을 활용하기 위해서는 예인수조나 회류수조 모형시험 결과를 바탕으로 CFD 프로그램에 대한 검증 절차를 거쳐야 한다. 그리고 예인수조와 회류수조에서 사용되는 모형선의 크기에 따른 Reynolds 수의 변화에 의한 유동현상의 차이 또한 모형시험 결과를 해석하는데 필요하다고 하겠다. 본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 CFD package인 Fluent를 사용하여 컨테이너선 주위의 유동해석을 자유수면 효과를 포함하여 수행하고, 그 결과를 예인수조 및 회류수조 시험결과와 각각 비교함으로써 CFD 해석결과의 검증과 모형선의 크기 차이에 의한 유동현상의 변화 등에 대하여 검토하였다.

본 연구에서 선택한 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS)은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KRISO, 현재 MOERI)에서 선형개발, 모형시험, 유동장 계측 등(반석호 등 1997, 1998, Kim et al. 2001)을 수행하였고, WAVIS 코드를 사용하여 자유수면을 포함한 선체주위의 유동해석(김진 등 2005)을 수행 한 바 있으며, ITTC benchmark data로서 2000년과 2005년 선박유체역학 관련 Workshop(Larsson et al. 2000, Hino et al. 2005)에서 test case로 활용되었다. 진송한 등(2005)은 1m 길이의 모형선을 제작하여 중소조선연구원(RIMS) 회류수조에서 실선-모형선 축적 비에 따른 저항성능을 비교한 바 있다.

본 연구에서는 KRISO 예인수조와 RIMS 회류수조에서 사용된 KCS 모형선을 대상으로 하여 자유수면의 영향을 고려한 수치계산을 수행하였다. 두 모형선 모두 Froude number(Fn)는 설계속도 24 knots에 해당하는 0.26로 정해졌으며, 해당 Fn에서 예인수조와 회류수조 모형의 경우 Reynolds number(Re)는 각각 1.4×10^7 와 0.791×10^6 이었다. 수치계산은 두 가지의 Reynolds number에 대하여 계산결과를 각각 KRISO와 RIMS의 시험결과와 비교하였으며, 두 계산결과를 비교하여 Reynolds 수의 차이에 따른 유동장의 변화를 파악하고자 하였다.

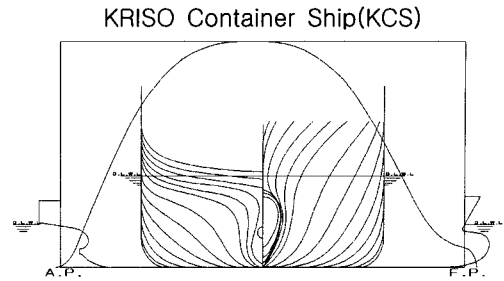


Fig. 1 Body plan and CP of KCS

Table 1 Principal particulars of the test ship

KCS	Prototype	TT Model	CWC Model
Scale ratio	1/1	1/31.5994	1/230
speed(m/s)	12.336	2.1944	0.814
L_{pp} (m)	230	7.2786	1.000
B(m)	32.2	1.0190	0.140
T(m)	10.8	0.3418	0.047
S(m ²)	9498.0	9.5121	0.1727
C_B		0.6505	
Froude No.		0.26	
Reynolds No.	2.39×10^9	1.4×10^7	0.791×10^6

2. 모형선 제원

수치계산을 위한 대상 선형은 KRISO에서 선형 개발한 3600TEU 컨테이너선(KCS)로 예인수조와 회류수조에서 사용한 모형선은 각각 1/31.5994, 1/230의 축적비로 제작 되었으며, 그 형상과 주요 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

3. 수치계산 방법

Reynolds 수가 다른 KCS 모형선 주위의 유동 현상을 계산하기 위한 선형 CAD 자료를 바탕으로 Gridgen(Pointwise Inc. 1997)을 사용하여 선체표면에 8,000개, 그리고 3,000,000개의 O-H형태의 공간 격자계를 생성하였으며, 계산영역은 수선간 길이(L_{pp})로 무차원화 하여 상류방향의 경우 F.P.로부터 1.0, 하류방향은 A.P.로부터 2.0, 횡방향은 선체중심선으로부터 1.0으로 정하였다. Fig. 2는

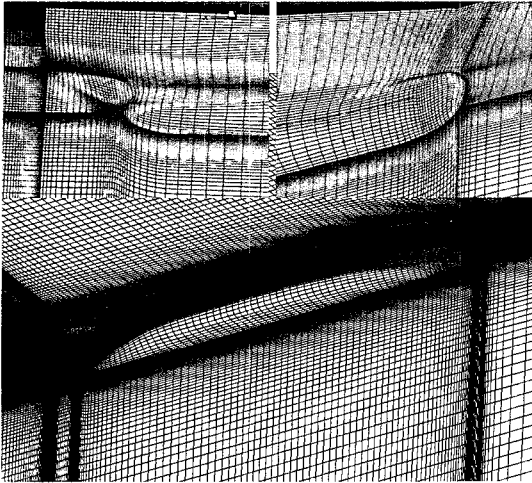


Fig. 2 Generated grid system

Gridgen을 사용하여 생성한 수치격자계의 일부를 보여주고 있다.

수치계산은 범용 상용 유동해석 프로그램인 Fluent(Fluent Inc. 2001)을 사용하였다. 자유수면에서 발생하는 조파현상을 모사하기 위해서는 Fluent에서 제공하는 VOF(Volume of Fluid)기법을 사용하였으며, 난류 유동장 계산을 위해 공학적으로 가장 널리 사용되고 있는 standard k-ε 난류모델을 사용하였다. 대류항 및 확산항은 각각 2차 정도의 상류차분법과 중심차분법을 사용하여 이산화하였고, 속도-압력의 연성은 SIMPLE방법을 사용하였다.

4. 계산결과

본 연구에서는 KCS 선형에 대하여 $Fn=0.26$, 그리고 $Re = 1.4 \times 10^7$ 와 0.791×10^6 에 대하여 수치계산을 수행하여 그 결과를 각각 KRISO의 예인수조 시험 결과 및 RIMS의 회류수조 시험결과와 비교하였으며, 두 계산 결과를 바탕으로 Reynolds수의 차이에 따른 유동현상의 변화를 비교 하였다. 우선 저항 계수, 선체 주위의 파형 및 선측파형을 살펴보았으며, 선미 유동현상의 차이를 검토하였다.

4.1 저항계수, 선체 주위의 파형, 선측파형 비교

Table 2 Comparison of resistance coefficients

Re	Case	$C_F \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
1.4×10^7	Exp. (KRISO)	2.832 (1957 ITTC)	0.832	3.664
	CFD(Fluent) (오차)	2.920 (3.1%)	0.847 (2.81%)	3.767 (2.81%)
0.791×10^6	Exp. (RIMS)	4.936 (1957 ITTC)	1.292	6.228
	CFD(Fluent) (오차)	5.430 (10.0%)	0.820 (0.35%)	6.250 (0.35%)

Table 2는 모형시험과 수치계산에서 얻어진 마찰저항계수(CF), 압력저항계수(CP) 그리고 전체저항계수(CT)를 비교하고 있다. 모형시험의 마찰저항계수는 ITTC-1957의 공식으로부터 계산된 결과이며 압력저항은 모형시험 결과의 잉여저항을 나타낸다. $Re = 1.4 \times 10^7$ 일 때 전체저항계수는 2.81%의 차이를 보이고 있으며, 이중 마찰저항계수에서 발생한 차이가 큰 부분을 차지하고 있다. $Re = 0.791 \times 10^6$ 에서의 마찰저항계수는 10.0%, 전체저항계수는 0.35%의 오차를 보여주고 있다. RIMS 회류수조의 모형시험에서 모형선이 작고 수조시험에서 통상 모형선 선수부 표면에 부착하는 스티드(stud)와 같은 난류 촉진장치를 사용하지 않았으며, CFD 계산에서는 전체를 난류 영역으로 계산을 수행한 결과인 점을 감안하면 직접적으로 회류수조 값과 비교하는 것은 무리가 있다고 판단된다. 전체저항계수의 비교에서 오차가 작은 것은 잉여저항계수의 추정에서 발생한 오차가 우연히 마찰저항에서의 오차와 반대로 나타남으로써 발생한 우연의 일치로 볼 수밖에 없다.

Fig. 3과 Fig. 4는 두 Reynolds 수에서 Fluent의 VOF법으로 계산된 선체 주위의 파형분포와 선체 표면에서의 선측 파형을 예인수조 시험과 비교하고 있다. 예인수조의 경우 $Re = 1.4 \times 10^7$ 에 해당하며, 선수 근처 일부와 두 번째 선정과 선저에서 보이는 차이는 Reynolds 수에 의한 차이라고 보기보다는 수치계산 상의 오차라고 생각된다.

Fig. 3의 CFD 결과중 파형 그림에서 $y/L=0.3$ 근처에서 나타난 불연속 부분은 VOF 계산결과에서 수치계산 블록간의 경계면에서 파형 계산 위치

의 차이가 있으며, 이를 삼간하여 그림을 그리는 과정에서 발생한 것으로 판단된다.

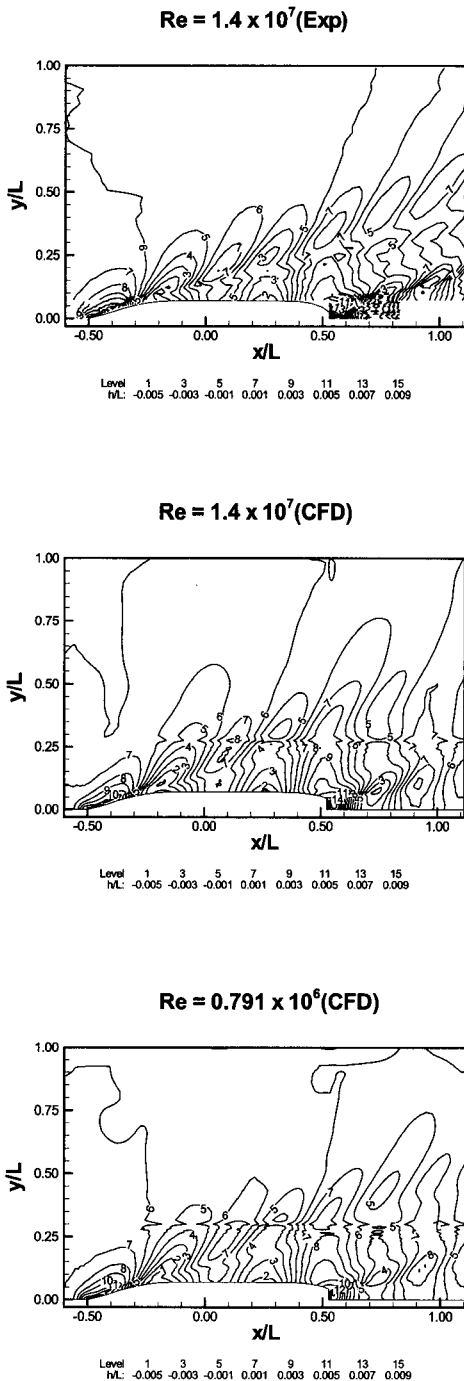


Fig. 3 Comparison of wave patterns

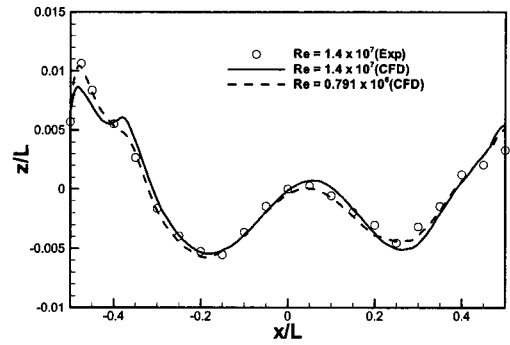


Fig. 4 Comparison of hull surface wave profile

4.2 선미 유동 현상 비교

Fig. 5~9는 각 스테이션에서의 축 방향 속도분포, 횡 방향 속도벡터를 보여 주고 있다. 먼저 $Re = 1.4 \times 10^7$ 일 때의 수치계산 결과를 실험결과와 비교해 보면, 각 스테이션에서의 축 방향 속도분포가 실험결과 보다 계산결과가 조금 넓게 나타나고 있으나 전체적으로는 비슷한 결과를 주고 있다. 하지만 St. -2와 -0.5767에서 계산된 속도 분포에서는 발지 보오텍스의 강도가 실험값에 비하여 너무 약하게 추정되어 축 방향 속도 분포에서 기대할 수 있는 갈고리 모양(hook-like shape)은 찾기 어렵고, 횡 방향 속도 벡터에서도 발지 보오텍스에 의해 야기된 회전성분이 크기나 위치가 부정확하게 예측되고 있음을 알 수 있다. 이는 standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하는 경우 항상 발생하는 사실로 이미 잘 알려져 있다. 이를 개선하기 위해서는 Reynolds stress model과 같은 고차의 난류모델을 채택해야 하는데, 자유수면을 포함한 유동계산의 경우 계산 시간과 노력이 많이 필요하고 또한 수렴도가 매우 나빠지는 경향을 보여 고차 난류모델의 채택이 제한적인 곳으로 알려져 있다.

Reynolds 수가 다른 두 계산 결과를 각 스테이션의 축 방향 속도에서 비교해 보면, St. 2와 1까지는 $Re = 0.791 \times 10^6$ 의 0.95 축 방향 속도 분포 영역이 $Re = 1.4 \times 10^7$ 보다 아래쪽으로 넓게 분포되어 있으며, St. 0.35, -0.5767, -2에서는 0.9 축 방향 속도 분포영역이 $Re = 0.791 \times 10^6$

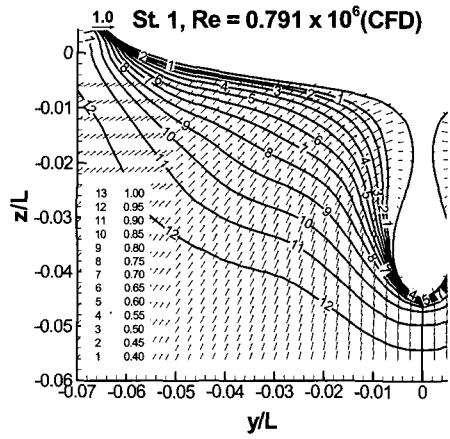
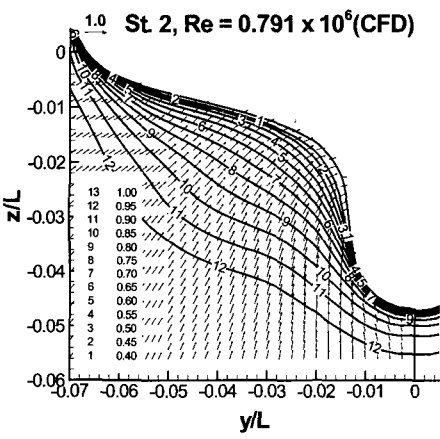
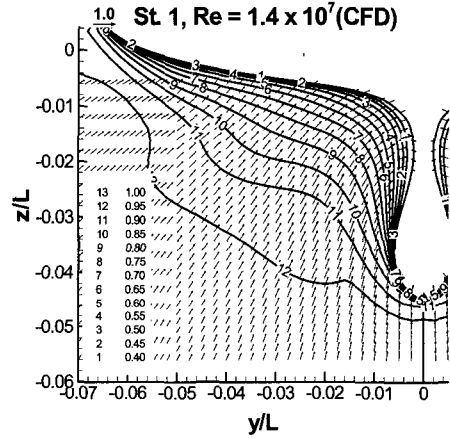
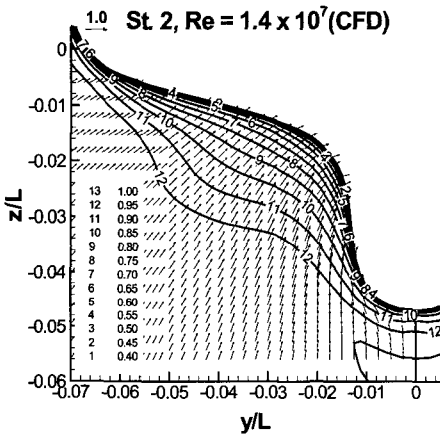
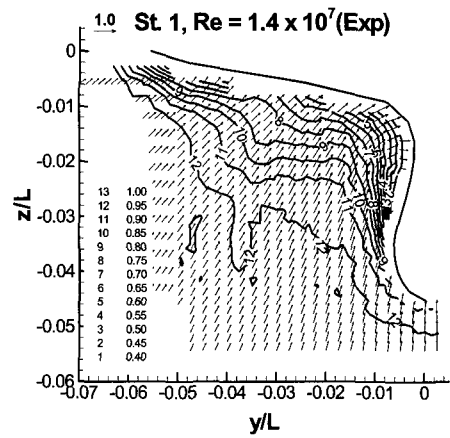
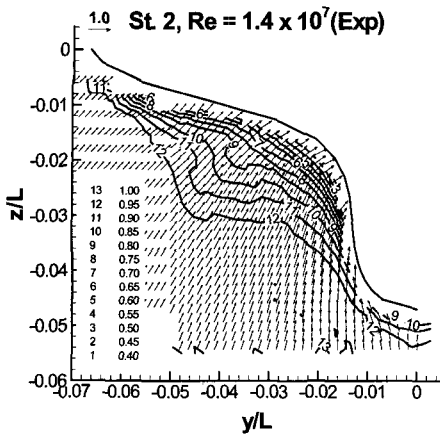


Fig. 5 Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at St. 2

Fig. 6 Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at St. 1

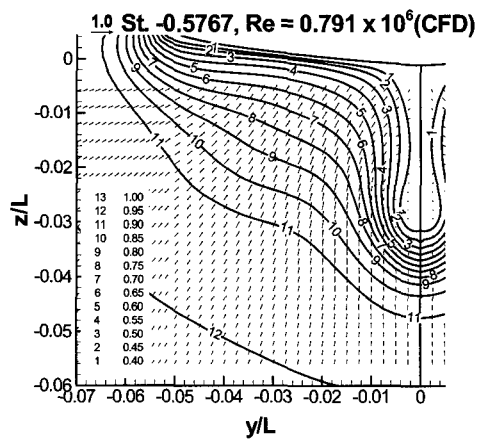
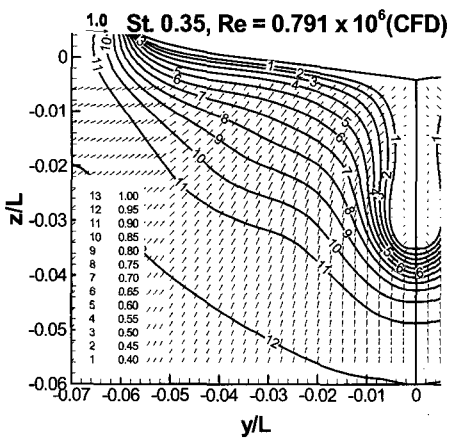
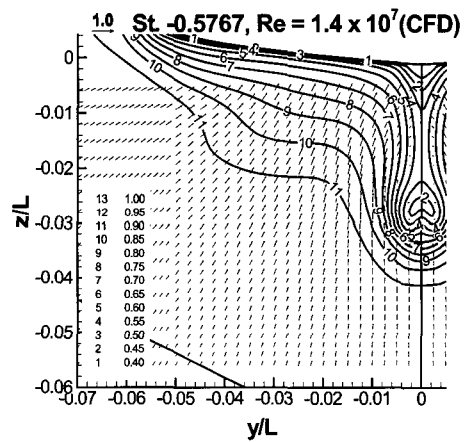
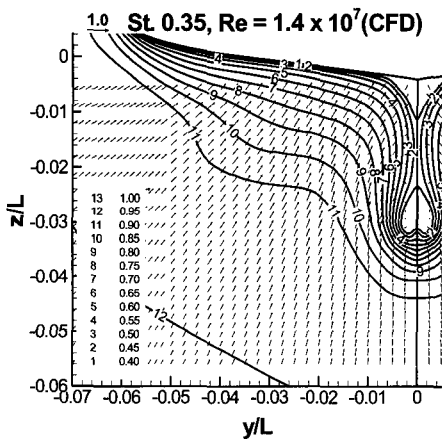
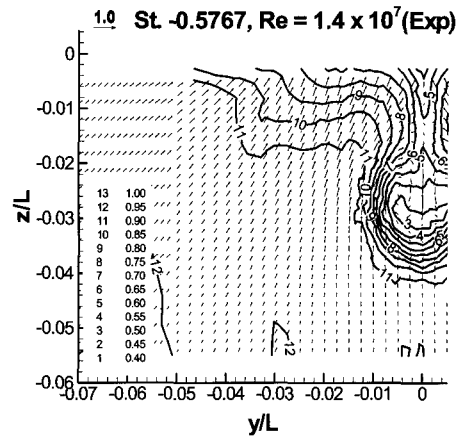
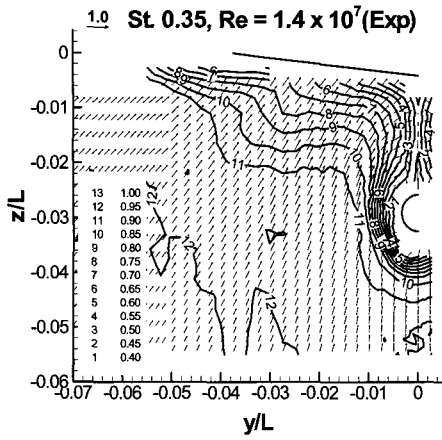


Fig. 7 Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at St. 0.35

Fig. 8 Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at St. -0.5767

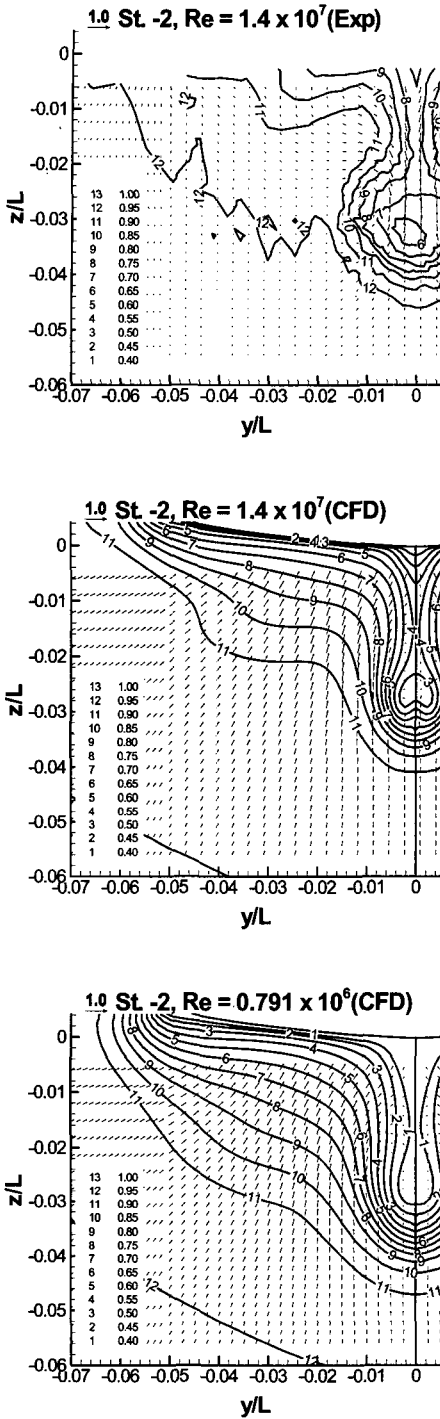


Fig. 9 Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at St. -2

보다 $Re = 1.4 \times 10^7$ 이 선체 쪽에 가깝게 위치하고 있음을 알 수 있다. 하지만 수치계산의 결과 모두 발지 보오텍스의 추정이 미흡한 것으로 보이는데, 이는 난류모델의 한계에서 기인된 것으로 생각된다.

Fig. 10은 선미 부근에서의 선체표면의 한계유선을 보여주고 있다. 추진기면으로 흘러 들어가는 부분을 보면 $Re = 1.4 \times 10^7$ 의 경우가 $Re = 0.791 \times 10^6$ 보다 약간 위쪽에서 추진기면으로 흘러들어 가는 것을 볼 수 있다.

다음은 선미 후방의 트랜섬 위에서 발생하는 파형 및 유동현상에 대하여 살펴보기로 한다. Fig. 11은 트랜섬 위에서의 파고를 보여주고 있다. $Re = 1.4 \times 10^7$ 은 KRISO 실험결과와 수치계산 결과가 잘 일치함을 보여주고 있다. 수치계산 결과인 $Re = 0.791 \times 10^6$ 와 $Re = 1.4 \times 10^7$ 의 파고 높이를 비교해 보면 트랜섬 바로 뒤에 나타나는 파정 높이가 $Re = 1.4 \times 10^7$ 일 때 조금 더 뚜렷

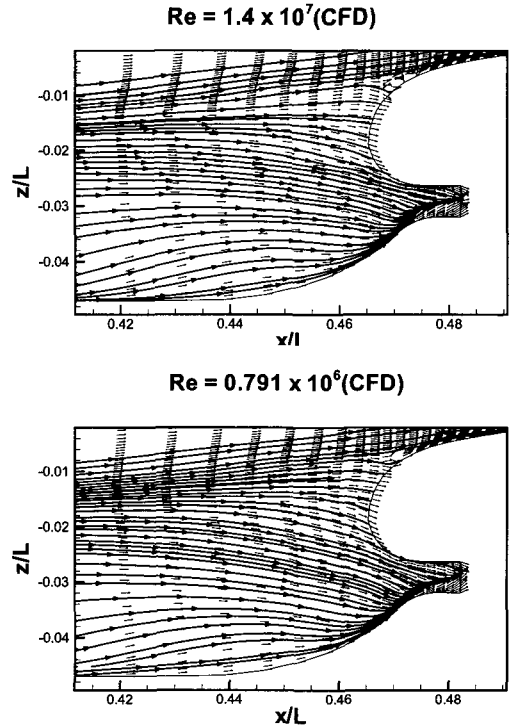


Fig. 10 Comparison of limiting streamlines for different Reynolds numbers of KCS

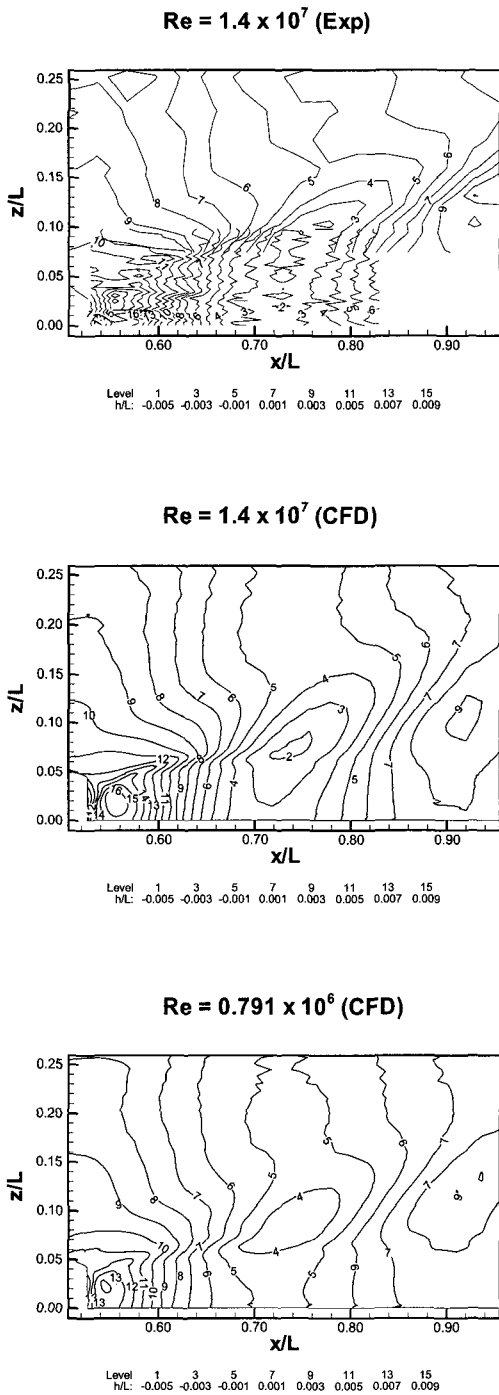


Fig. 11 Comparison of the transom wave pattern

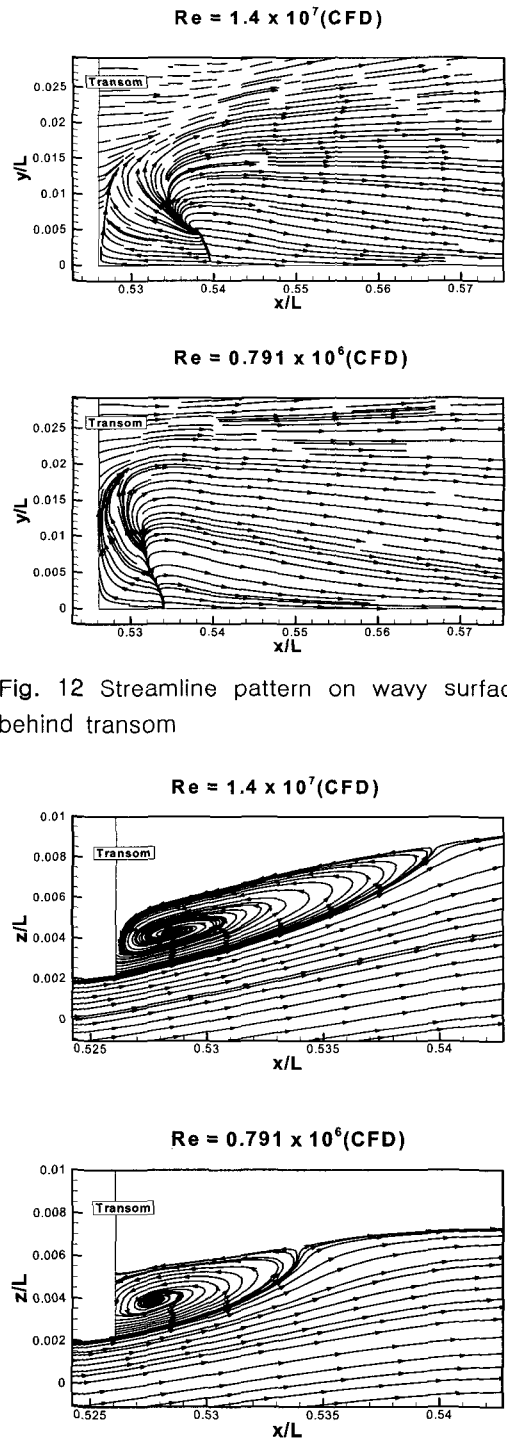


Fig. 12 Streamline pattern on wavy surface behind transom

Fig. 13 Streamline pattern at center plane behind transom

하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그로 인하여 파경사에서도 차이를 찾아볼 수 있다.

Fig. 12는 트랜섬 뒤 자유수면에서의 유선을 보여 주고 있다. $Re = 1.4 \times 10^7$ 일 때 $x/L=0.54$ 까지 박리 영역이 나타나고, $y/L=0.005$ 부분까지 강하게 생성되어 그 옆으로 크게 돌아가는 것을 보여주고 있으며, $Re = 0.791 \times 10^6$ 에서는 $x/L=0.534$ 부분에서 반류가 생성되어 $y/L = 0.01$ 부분까지 생성되어 돌아가는 것을 보여 주고 있다. Fig. 13은 트랜섬 뒤 센터라인 부분의 유선을 보여주고 있다. $Re = 0.791 \times 10^6$ 일 때 $x/L=0.528$, $z/L=0.04$ 부분에서 유동 박리 영역의 중심이 나타나지만 $Re = 1.4 \times 10^7$ 은 약간 뒤에서 나타나는 것을 볼 수 있다. $Re = 0.791 \times 10^6$ 일 때 $Re = 1.4 \times 10^7$ 보다 자유수면의 높이가 낮으며 자유수면의 경사 각도가 작다는 것을 볼 수 있다. 이렇게 Reynolds 수의 변화로 인하여 선미에서 트랜섬 후방으로 치고 올라오는 속도장의 차이가 나타나고, 이로 인하여 박리영역과 파형형성에 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 범용 유동해석 프로그램인 Fluent package를 사용하여 KRISO 3600TEU Container Ship(KCS)의 두 가지 모형스케일에서의 유동장을 계산하여 실험값과 비교함으로써 Reynolds 수에 따른 유동장의 변화를 살펴보았다. Reynolds 수의 차이에 따라 경계층의 두께, 추진기면에 유입되는 흐름의 차이, 트랜섬 뒤에서의 유동 현상 차이를 확인 하였다. 하지만 Reynolds 수가 작을 때, 모형 시험 뿐만 아니라 수치계산에서도 난류 현상의 미성숙으로 인한 실험값 및 수치계산 결과의 활용도에 문제가 생길 수 있으며, 선미 트랜섬 후방의 선미파는 Reynolds수에 따라 박리 영역이 확연히 달라지며, 그로 인해 파형 및 파경사에도 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 목포대학교 NURI사업과 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받았음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 김진, 박일룡, 김광수, 반석호, 2005, "KRISO 컨테이너선 및 VLCC 선형에 대한 RANS 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호, pp. 593-600.
- 반석호 등, 1998, 선박의 저항 성능 향상기술(최종보고서), 해양시스템안전연구소.
- 반석호, 임근태, 김우전, 김도현, 윤현세, 엄주열, 1997, "3600TEU급 컨테이너선 모형주위의 유동계측," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 300-304.
- 진송한, 심상목, 박충환, 손창련, 김우전, 현범수, 2005, "3600TEU 컨테이너선의 실선-모형선 축적비에 따른 저항성능 비교 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 91-95.
- Fluent Inc., 2001, Fluent manual.
- Hino, T.(ed.), 2005, Proc. of CFD Workshop Tokyo 2005, Japan.
- Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, D.H., 2001, "Measurement of flows around modern commercial ship models," Experiments in Fluids, Vol. 31, No. 5, pp. 567-578.
- Larsson, L., Stern, F. and Bertram, V.,(ed.), 2000, Gothenburg 2000: A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg.
- Pointwise Inc., 1997, Gridgen manual.



< 김 병 남 >



< 박 중 환 >



< 김 우 전 >