

격자, 난류모형 및 이산화 방법이 유동해석 결과에 미치는 영향

박동우*† · 윤현식**

* 동명대학교 조선해양공학과, ** 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터

Effect of Grid, Turbulence Modeling and Discretization on the Solution of CFD

Dong-Woo Park*† · Hyun-Sik Yoon**

* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

** Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약 : 본 연구는 격자수, 첫 번째 격자까지의 거리(Y_{P+}), 난류모델 그리고 이산화 방법에 따른 해의 변화량을 조사하였다. 대상선박은 KVLCC이며, 격자구성과 유동해석은 상용코드인 Gridgen V15와 FLUENT를 사용하였다. 검토는 2가지 파트로 나누어서 수행하였다. 첫 번째 파트는 격자수, 난류모델 그리고 이산화 방법의 조합에 따른 해의 영향성을 평가하였다. 두 번째 파트는 적합한 Y_{P+} 선정에 초점을 두었다. 격자수와 이산화 방법이 동일한 경우 마찰저항은 난류모델에 따라 약 1% 내에서 차이를 보였으나, 압력저항은 약 9%의 큰 차이를 보였다. Y_{P+} 와 이산화 방법이 동일한 경우 Y_{P+} 를 30과 50으로 설정하였을 때 마찰저항은 난류모델에 따라 약 1% 내에서 차이를 보였으나, 100에서는 약 3% 차이를 보였다. 반면, 압력저항은 Y_{P+} 값에 무관하게 난류모델에 따라 약 10% 차이를 보였다. 난류모델과 이산화 방법이 동일한 경우 격자 수 변화 따라 마찰저항, 압력저항 그리고 전 저항 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 난류모델과 이산화 방법이 동일한 경우 Y_{P+} 의 변화에 따라 마찰저항은 5~8%의 큰 차이를 보였고, 압력저항은 큰 차이를 보이지 않았다.

핵심용어 : 유동해석, 격자수, 첫 번째 격자까지의 거리, 난류모델, 이산화 방법, KVLCC

Abstract : The current work investigated the variation of numerical solutions according to the grid number, the distance of the first grid point off the ship surface, turbulence modeling and discretization. The subject vessel is KVLCC. A commercial code, Gridgen V15 and FLUENT were used the generation of the ship hull surface and spatial system and flow computation. The first part of examination, the effect of solutions were accessed depending on the grid number, turbulence modeling and discretization. The second part was focus on the suitable selection of the distance of the first grid point off the ship surface: Y_{P+} . When grid number and discretization were fixed the same value, the friction resistance showed differences within 1% but the pressure resistance showed big differences 9% depending on the turbulence modeling. When Y_{P+} were set 30 and 50 for the same discretization, friction resistance showed almost same results within 1% according to the turbulence modeling. However, when Y_{P+} were fixed 100, friction resistance showed more differences of 3% compared to Y_{P+} of 30 and 50. Whereas pressure resistance showed big differences of 10% regardless of turbulence modeling. When turbulence modeling and discretization were set the same value, friction, pressure and total resistance showed almost same result within 0.3% depending on the grid number. Lastly, When turbulence modeling and discretization were fixed the same value, the friction resistance showed differences within 5~8% but the pressure resistance showed small differences depending on the Y_{P+} .

Key Words : Flow computation, Grid number, Distance of the first grid point off the ship surface, Turbulence modeling, Discretization, KVLCC

1. 서 론

전산유체역학(CFD)을 이용하여 Fig. 1(a)~1(b)에 보이는 것과 같이 일반적인 선형과 특이한 형상을 적용한 선형에 대한 유체역학적 특성을 평가할 경우 격자 시스템과 수치 기법 등에 따라 민감한 결과를 보여줄 수 있다. Fig. 2의 Zone I은 Fig. 1(b)의 특이한 형상으로 인해 유동이 유입하여 유속이 가속되고 압력이 낮아지는 현상 등을 보여주고 있다. Fig.

1(b)의 형상 적용으로 인하여 유동 해석 결과는 격자 수, 난류모형 및 이산화 방법 등의 수치 기법에 따라 상당한 영향을 받을 것으로 예상된다.

Kim et al.(2009)은 138K LNG선 모형(KLNG) 주위의 난류유동 계산을 자유수면의 파계 생성을 포함하여 수행하였다. 격자계의 분포에 따라서는 전체 격자수를 고정하고 첫 번째 셀 중심의 y_1^+ 에 대한 변화를 검토하였다. y_1^+ 가 200을 넘는 경우에는 값의 신뢰도가 떨어짐을 보여주었다. y_1^+ 가 240인 경우에는 선미 속도장 예측이 부정확한 결론을 내렸다.

† Corresponding Author : dwpark@tu.ac.kr, 051-629-1654

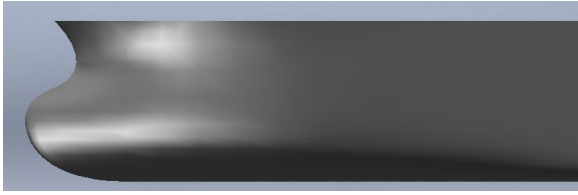


Fig. 1(a). KVLCC.

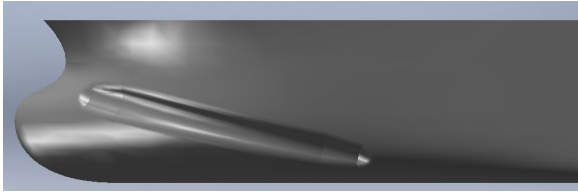


Fig. 1(b). KVLCC with special shape.

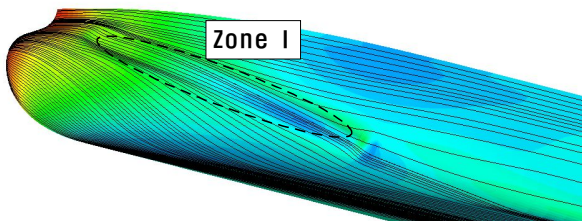


Fig. 2. Solutions employing CFD for Fig. 1.

Yang et al.(2010)은 모형선과 실선 스케일의 저항 추정과 반류분포 등에 대한 차이를 확인하기 위해 난류 유동장에 대한 수치계산을 수행하였다. 모형선 스케일의 해석에서는 난류모형 사용에 따라 Reynolds-stress model(RSM)을 사용한 수치계산이 Realizable k-ε model(RKE)에 비해 보다 정확한 수치 해를 제공하는 것을 제시하였다. 또한, RKE를 사용한 수치계산에서는 RSM을 사용한 경우에 비해 점성경계층의 두께가 지나치게 얇아지는 경향을 보였으며, 빔지 보오텍스에 의한 갈고리 모양의 등속선은 거의 나타나지 않은 결과를 보여주었다.

Choi et al.(2010)은 고 레이놀즈수 유동에 대한 수치해석을 위한 사전 조사로서 벽함수와 높은 y_1^+ 값을 사용하는 경우 y_1^+ 값에 따라 수치 해에 주는 영향을 살펴보았다. 그 결과 중 레이놀즈 수 10^5 과 10^6 은 벽함수 사용 여부에 따라 상당히 큰 차이를 보여 주었으며, 10^6 이하의 레이놀즈 수 유동에서는 벽함수 사용에 주의가 필요하다는 결론을 내렸다.

Nah et al.(2010)은 SUBOFF 모형 후방 난류항적의 수치 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 다양한 격자계에 대한 수렴성 테스트와 함께 적절한 난류모형을 선정하기 위한 비교 계산을 수행하였다. 난류모델로는 Realizable k-ε model, standard k-ε model 그리고 Reynolds Stress model을 사용하여 비교한 뒤 적절한 난류모델을 선정하였다.

본 논문의 목적은 격자 수, 첫 번째 격자까지의 거리, 난류모델 그리고 이산화 방법 등에 따른 해의 변화량을 조사하

는 것이다. 수행방법의 차별성은 다양한 격자시스템과 수치 기법에 관하여 매트릭스 조합을 구성하여 체계적인 평가를 한 부분이다. 대상선박은 KVLCC이며, 격자구성과 유동해석을 위해서 상용 코드인 Gridgen V15와 FLUENT를 각각 사용하였다.

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 3차원 정상상태 비압축성 점성유동을 고려하였다. 난류모델은 Realizable k-ε과 Shear Stress Transport k-w(이하, SST k-w)를 사용하였다. 이에 대응하는 지배방정식으로는 아래의 연속방정식과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방정식들인, 식(1)과 식(2)가 각각 고려되었다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

여기서 x_i , U_i , p , ρ 와 μ 는 직각좌표계, 속도성분들, 압력, 밀도와 점성을 각각 나타낸다. 또한, 식(2)의 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)항인 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 은 Realizable k-ε과 k-w SST모델에 의해 결정된다.

유한체적법 기반의 상용 프로그램인 FLUENT(2008)를 사용하였으며, 이중모형에 대한 계산을 수행하였다. 본 계산에서 고려된 좌표계, 계산영역 및 경계조건들은 Fig. 3에 도시하였다.

Table 1은 본 연구에서 고려한 선형인 KVLCC의 주요 제원을 보여준다.

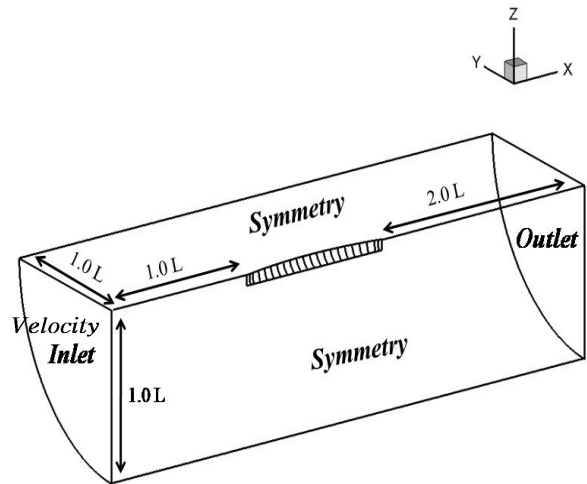


Fig. 3. A schematic diagram of the system.

격자, 난류모형 및 이산화 방법이 유동해석 결과에 미치는 영향

Table 1. Computational conditions for KVLCC

KVLCC	
$L_{pp}(m)$	5.5172
$B(m)$	1.0
$T(m)$	0.3586
$V_s(m/s)$	1.0469
R_N	4.6×10^6
$Wetted\ Surface\ Area(m^2)$	4.1285

본 연구에서 고려된 완화계수는 Fluent에서 제시하는 기본 값들을 사용하였으며 Table 2에 상세히 정리하였다. 완화 계수에 대한 좀 더 상세한 내용은 Fluent 6.3 User's Guide(2008)를 통해 확인할 수 있다.

Table 2. Under-Relaxation Factors for each variables

Pressure	0.3
Desity	1
Body forces	1
Momentum	0.7
Turbulent kinetic energy	0.8
Specific Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1

3. 결과 및 검토

3.1 격자 수, 난류모형 및 이산화 방법에 대한 조사

세 가지 조합에 대한 수치계산 해의 영향성 평가를 하였다. 그 조합은 Table 3에 정리하였다. 여기서, 첫 번째 격자까지의 거리인 Y_{p+} 는 50, 벽함수는 Non-equilibrium 그리고 압력-속도 연성 항(Pressure-velocity coupling)은 SIMPLE-C로 고정하였다. 격자수는 23차 ITTC에서 추천하는 방법(Wilson et al., 2001)에 따라 Coarse 격자인 Case 1, Medium 격자인 Case 2 그리고 Fine 격자인 Case 3의 세 가지 격자계를 작성하였다. 난류모형은 여러 가지 중에서 Realizable k- ϵ 모델과 Shear stress transport k- ω (SST k- ω)모델을 사용하였다. 이산화 방법은 2nd order upwind와 QUICK을 사용하였다.

Table 3. Calculation conditions for dependency study on three grid systems (KVLCC)

Y_{p+}	Grid No.	Turbulence Modeling	Wall Function	Pressure-Velocity Coupling	Discretization
50	ab. 80 million	Realizable k- ϵ	Non-equilibrium	SIMPLE-C	2 nd Order Upwind
		k- ω SST	-	"	QUICK
	ab. 140 million	Realizable k- ϵ	"	"	2 nd Order Upwind
		k- ω SST	-	"	QUICK
	ab. 210 million	Realizable k- ϵ	"	"	2 nd Order Upwind
		k- ω SST	-	"	QUICK

Fig. 4와 Fig. 5 그리고 Table 4는 사용된 세 가지 격자 수 별로 두 가지 난류모델과 두 가지 이산화 방법에 의한 압력 저항과 마찰저항을 비교한 것이다.

압력저항은 동일한 격자수와 동일한 이산화 방법을 사용할 경우 Realizable k- ϵ 모델을 사용한 것이 SST k- ω 모델을 사용한 것 보다 약 9% 정도 작은 값을 나타내었다. 압력저항은 전 저항에서 차지하는 비율이 작기 때문에서 절대 값은 작지만 민감한 결과를 보이는 것 같다. 이산화 방법에 대한 조사에서는 동일한 격자수와 동일한 난류모델을 적용할 경우, QUICK을 사용한 것이 2nd order upwind를 사용한 값보다 약 5% 작은 값을 나타내었다.

마찰저항은 난류모델 조사에서는 압력저항의 결과와는 반대로 동일한 격자수와 동일한 이산화 방법을 사용할 경우 Realizable k- ϵ 모델을 사용한 것이 SST k- ω 모델을 사용한 것 보다 약 1.0% 정도 큰 값을 나타내었다. 이산화 방법에 대한 조사에서는 동일한 격자수와 동일한 난류모델을 적용할 경우, QUICK과 2nd order upwind를 사용한 것 모두가 대동소이한 결과를 보여주었다.

여기까지 내릴 수 있는 결론은 어떠한 난류모델을 적용하는가에 따라 압력저항과 마찰저항이 차지하는 양에 민감한 영향을 주는 것으로 판단된다.

Fig. 6과 Table 4는 전 저항을 나타낸 것으로 동일한 격자수와 동일한 이산화 방법을 사용할 경우 Realizable k- ϵ 모델을 사용한 것이 SST k- ω 모델을 사용한 것 보다 작은 값을 나타내었다. 이것은 Realizable k- ϵ 모델을 사용한 경우가 SST k- ω 모델을 사용한 경우보다 압력저항이 줄어든 양이 마찰저항이 증가한 양 보다 더 크게 작용하여 나타난 결과로 판단된다. 동일한 격자수와 동일한 난류모델에 대하여 두 가지 이산화 방법을 사용하였을 때 전 저항의 값을 비교하여 보면 QUICK이 2nd order upwind에 의한 방법 보다 약 1% 정도 적게 추정되었다.

격자수가 다르더라도 동일한 난류모델과 동일한 이산화 방법을 사용할 경우 전 저항의 값은 0.5% 내에서 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 그리고 격자수가 증가할수록 일정한 값으로 수렴하는 형태를 보여 주었다.

3.2 적합한 Y_{p+} 에 대한 조사

적합한 Y_{p+} 에 대한 조사를 위해서 격자수는 세 가지 중에서 140만개를 선정하였다. Y_{p+} 는 10, 30, 50 그리고 100 네 가지에 대한 조사를 하였으며, 매트릭스 조합은 Table 5에 나타내었다. 난류모델과 이산화 방법은 Realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델 그리고 QUICK과 2nd order upwind를 사용하였다.

Fig. 7과 Table 6은 Y_{p+} 에 따른 압력저항의 변화를 보여준다. 우선, $Y_{p+}=10$ 은 적합하지 않는 것으로 보인다.

압력저항은 동일한 Y_{p+} 에 대하여 동일한 난류모델을 적용하였을 때 2nd order upwind를 사용한 것이 QUICK을 사용한 값보다 5% 정도 크게 나타났다. 동일한 Y_{p+} 에 대하여 동일한 이산화 방법을 사용하였을 때 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용한 것이 SST $k-\omega$ 모델을 사용한 것 보다 약 10% 정도 적게 추정되었다. 난류모델에 따른 압력저항의 변화는 아주 민감한 결과를 보여주고 있다. Y_{p+} 와 압력저항의 관계는

Fig. 4에서 보여준 격자 수 조사결과와 정성적 그리고 정량적으로 유사한 결과를 보여 주었다.

Fig. 8과 Table 6은 Y_{p+} 에 따른 마찰저항의 변화를 보여준다. 역시, $Y_{p+}=10$ 은 적합하지 않는 것으로 보인다.

마찰저항은 동일한 Y_{p+} 에 대하여 동일한 난류모델을 적용하였을 때 2nd order upwind와 QUICK 모두 거의 동일한 결과를 보여주었다. 동일한 Y_{p+} 에 대하여 동일한 이산화 방법을 사용하였을 때 압력저항과는 반대로 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용한 것이 SST $k-\omega$ 모델을 사용한 것 보다 약 1% 정도 크게 추정되었다. 난류모델에 따른 마찰저항 역시 아주 민감한 결과를 보여주고 있다. 그리고 Y_{p+} 가 증가할수록 마찰저항 값은 작아지는 경향을 보여주었다.

Fig. 9는 Y_{p+} 에 따른 전 저항의 변화를 보여준다. $Y_{p+}=10$ 은 압력저항과 마찰저항의 분석에서 보여준 대로 적합하지 않는 것으로 보인다. Y_{p+} 가 30에서 100까지는 동일한 난류모델에서는 거의 일정한 값을 보여 주었다.

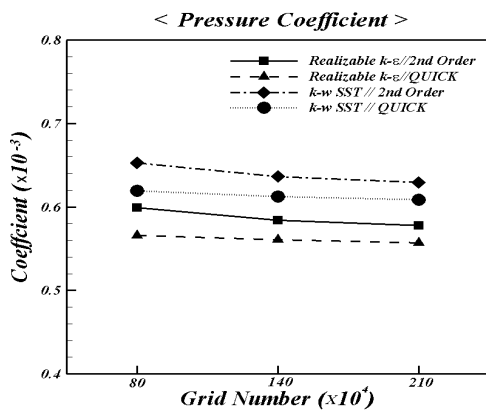


Fig. 4. Pressure resistance coefficient depending on turbulence model.

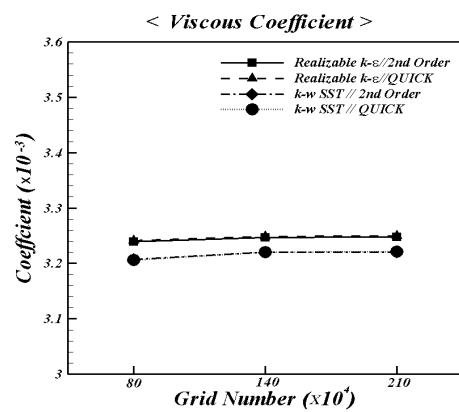


Fig. 5. Viscous resistance coefficient depending on turbulence model.

Table 4. Comparison of resistances by dependency study of three grid systems

Grid No.	Turbulence Modeling	Discretization	Force(N)			Coefficient		
			Pressure	Viscous	Total	Pressure $\times 10^3$	Viscous $\times 10^3$	Total $\times 10^3$
ab. 80 million	Realizable $k-\epsilon$	2 nd Order Upwind	1.35473	7.32664	8.68137	0.59901	3.23958	3.83860
		QUICK	1.27985	7.33056	8.61042	0.56591	3.24132	3.80722
	$k-\omega$ SST	2 nd Order Upwind	1.47574	7.25287	8.72862	0.65252	3.20697	3.85949
		QUICK	1.40044	7.25118	8.65162	0.61922	3.20622	3.82544
ab. 140 million	Realizable $k-\epsilon$	2 nd Order Upwind	1.32140	7.34277	8.66418	0.58423	3.24645	3.83069
		QUICK	1.26813	7.34730	8.61543	0.56068	3.24846	3.80913
	$k-\omega$ SST	2 nd Order Upwind	1.43851	7.28295	8.72146	0.63601	3.22000	3.85601
		QUICK	1.38505	7.28267	8.66772	0.61237	3.21988	3.83225
ab. 210 million	Realizable $k-\epsilon$	2 nd Order Upwind	1.30722	7.34535	8.65257	0.57791	3.24734	3.82526
		QUICK	1.25987	7.35005	8.60993	0.55698	3.24942	3.80640
	$k-\omega$ SST	2 nd Order Upwind	1.42406	7.28450	8.70856	0.62957	3.22044	3.85001
		QUICK	1.37634	7.28578	8.66212	0.60847	3.22101	3.82948

격자, 난류모형 및 이산화 방법이 유동해석 결과에 미치는 영향

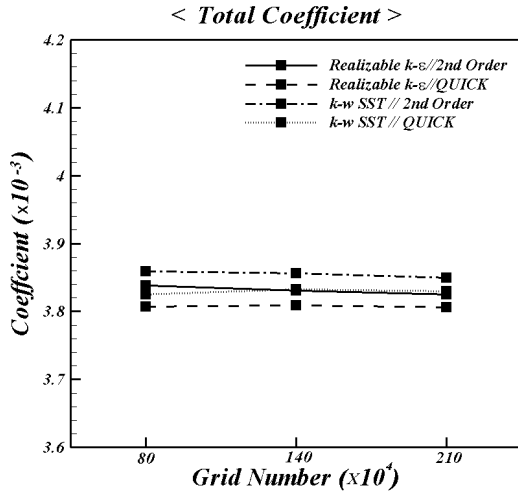


Fig. 6. Total resistance coefficient depending on turbulence model.

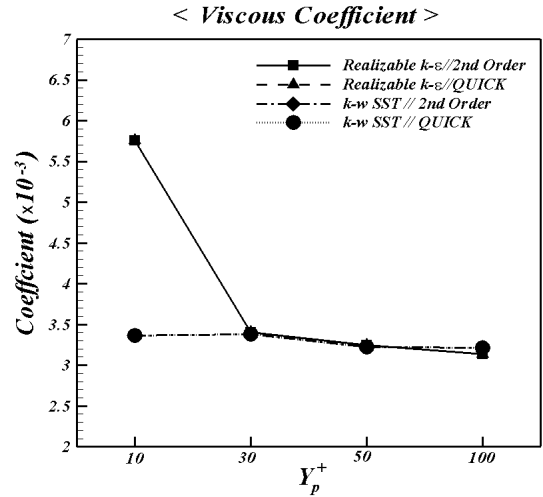


Fig. 8. Viscous resistance coefficient depending on Y_p^+ .

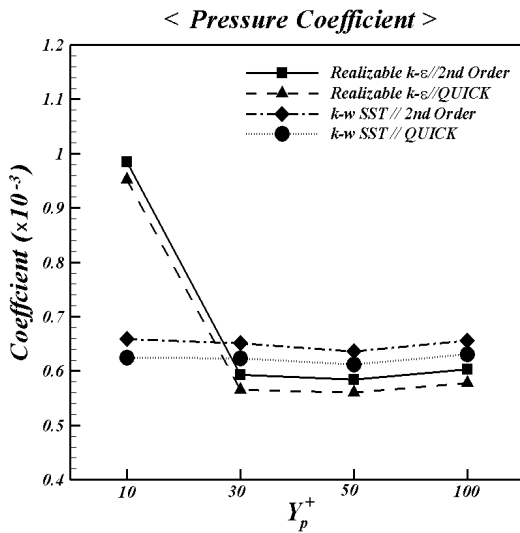


Fig. 7. Pressure resistance coefficient depending on Y_p^+ .

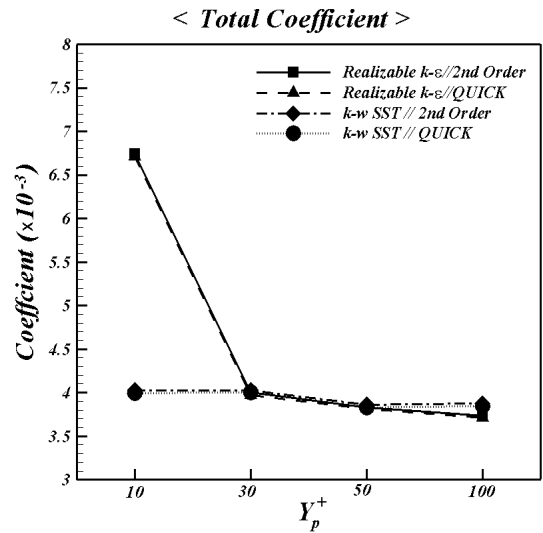


Fig. 9. Total resistance coefficient depending on Y_p^+ .

Table 5. Calculation conditions for dependency study on the distance of the first grid point off the ship surface(Y_p^+)

Grid No.	Y_p^+	Turbulence Modeling	Wall Function	Pressure-Velocity Coupling	Discretization
ab. 140 million	10	Realizable $k-\epsilon$	Non-equilibrium	SIMPLE-C	2 nd Order Upwind
		$k-\omega$ SST	-	"	QUICK
	30	Realizable $k-\epsilon$	Non-equilibrium	SIMPLE-C	2 nd Order Upwind
		$k-\omega$ SST	-	"	QUICK
	50	Realizable $k-\epsilon$	Non-equilibrium	SIMPLE-C	2 nd Order Upwind
		$k-\omega$ SST	-	"	QUICK
	100	Realizable $k-\epsilon$	Non-equilibrium	SIMPLE-C	2 nd Order Upwind
		$k-\omega$ SST	-	"	QUICK

Table 6. Comparison of resistances by dependency study of Y_{p+}

Y_{p+}	Turbulence Modeling	Discretization	Force(N)			Coefficient		
			Pressure	Viscous	Total	Pressure $\times 10^3$	Viscous $\times 10^3$	Total $\times 10^3$
10	Realizable k- ϵ	2 nd Order Upwind	2.22588	13.02158	15.24746	0.98412	5.75719	6.74132
		QUICK	2.15171	13.02220	15.17383	0.95133	5.75743	6.70876
	k- ω SST	2 nd Order Upwind	1.49028	7.60945	9.09973	0.65889	3.36434	4.02324
		QUICK	1.41308	7.61331	9.02639	0.62476	3.36605	3.99081
30	Realizable k- ϵ	2 nd Order Upwind	1.34154	7.70158	9.04312	0.59313	3.40509	3.99822
		QUICK	1.27927	7.70425	8.98353	0.5656	3.40627	3.97187
	k- ω SST	2 nd Order Upwind	1.47224	7.63759	9.10983	0.65092	3.37680	4.02772
		QUICK	1.40949	7.64053	9.05002	0.62318	3.37809	4.00127
50	Realizable k- ϵ	2 nd Order Upwind	1.32140	7.34277	8.66418	0.58423	3.24645	3.83069
		QUICK	1.26813	7.34730	8.61543	0.56068	3.24846	3.80913
	k- ω SST	2 nd Order Upwind	1.43851	7.28295	8.72146	0.63601	3.22000	3.85601
		QUICK	1.38505	7.28267	8.66772	0.61237	3.21988	3.83225
100	Realizable k- ϵ	2 nd Order Upwind	1.36271	7.08412	8.44683	0.60250	3.13210	3.73460
		QUICK	1.30783	7.08659	8.39443	0.57823	3.13320	3.71143
	k- ω SST	2 nd Order Upwind	1.48432	7.27688	8.76120	0.65626	3.21733	3.87359
		QUICK	1.42557	7.27427	8.69983	0.63029	3.21617	3.84646

4. 결론

본 논문의 CFD에 의한 유동해석 과정에서 격자수, 첫 번째 격자까지의 거리, 난류모델 그리고 이산화 방법에 따른 해의 변화량을 조사하는 것이다. 몇 가지 결론은 다음과 같다.

- 1) 동일한 격자수와 난류모델 그리고 동일한 Y_{p+} 와 난류모델 조합에서 이산화 방법에 따른 저항 변화는 다음과 같다. 마찰저항은 이산화 방법에 따라 0.1% 내에서 차이를 보였다. 압력저항은 QUICK 방법이 2nd Order Upwind 보다 약 4-5% 적게 추정되었다. 전저항은 압력저항의 영향으로 QUICK 방법이 2nd Order Upwind 보다 약 0.5% 내에서 적게 추정되었다.
- 2) 동일한 격자수와 이산화 방법에서 Realizable k- ϵ 과 k-w SST에 따라 마찰저항, 압력저항 그리고 전저항을 비교하였다. 마찰저항은 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 0.8% 크게 추정되었다. 압력저항은 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 9% 적게 추정되었다. 전저항은 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 0.5% 적게 추정되었다.
- 3) 동일한 Y_{p+} 와 이산화 방법에서 Realizable k- ϵ 과 k-w SST에 따라 마찰저항, 압력저항 그리고 전저항을 비교하였다. $Y_{p+}=30$ 과 50에서의 마찰저항은 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 0.8% 크게 추정되었고, $Y_{p+}=100$ 에서는 반대로 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 3%

적게 추정되었다. 압력저항은 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 10% 적게 추정되었다. 전저항은 $Y_{p+}=30$ 과 50에서는 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 0.7% 적게 추정되었고, $Y_{p+}=100$ 에서는 Realizable k- ϵ 이 k-w SST 보다 약 4% 적게 추정되었다.

- 4) 동일한 난류모델과 이산화 방법에서 격자수를 80만개, 140만개 그리고 210만개 변화에서는 마찰저항, 압력저항 그리고 전저항 모두 약 $\pm 0.3\%$ 내에서 차이를 보였다.
- 5) 동일한 난류모델과 이산화 방법에서 Y_{p+} 를 30, 50 그리고 100으로의 변화에서는 마찰저항은 약 5-8% 차이를 보였고, 압력저항은 $\pm 0.3\%$ 내에서 차이를 보였다. 전저항은 마찰저항의 차이로 인해 4~6%의 차이를 보였다.

References

- [1] Choi, J. K. and H. T. Kim(2010), A Study of using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow, Journal of SNAK, Vol. 47, No. 5, pp. 647-655.
- [2] Fluent 6.3 User's Guide(2008), Fluent Inc.
- [3] Kim, B. N., W. J. Kim, K. S. Kim and I. R. Park(2009), The Comparison of Flow Simulation Results around a KLNG, Journal of SNAK, Vol. 46, No. 3, pp. 219-231.
- [4] Nah, Y. I., H. D. Bang and J. C. Park(2010), Numerical

격자, 난류모형 및 이산화 방법이 유동해석 결과에 미치는 영향

Simulation of Turbulent Wake Behind SUBOFF Model,
Journal of SNAK, Vol. 47, No. 4, pp. 512-524.

- [5] Yang, H. Y., B. N. Kim, J. H. Yoo and W. J. Kim(2010),
Wake Comparison between Model and Full Scale Ships
Using CFD, Journal of SNAK, Vol. 47, No. 2, pp. 150-162.
- [6] Wilson, R. V., F. Stern, H. Coleman and E. Paterson(2001),
Comprehensive Approach to verification and Validation of
CFD Simulations-Part2: Application for RANS Simulation
of a Cargo/Container Ship, "ASME Journal of Fluids
Engineering, Vol. 123, pp. 803-810.

원고접수일 : 2014년 04월 11일

원고수정일 : 2014년 07월 30일 (1차)

2014년 08월 19일 (2차)

게재확정일 : 2014년 08월 27일