論 文

大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 34 卷 第 1 號 1997年 2月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 34, No. 1, February 1997

선미 점성 유동장에 미치는 척도효과에 관한 연구

곽영기*, 민계식*, 오건제**, 강신형***

Study on the Scale Effect of Viscous Flows around the Ship Stern

by

Y. K. Kwak*, K. S. Min*, K. J. Oh** and S. H. Kang***

요 약

본 연구는 실제 선박 주위의 점성 유동에 대해 RANS방정식을 사용하여 해석함으로써 그 계산 방법의 타당성 및 선형 설계에의 유효성을 입증하고, 모형선 크기에 따른 점성 유동의 영향, 즉 척도효과에 대한 기초 연구를 목적으로 하였다. 높은 레이놀즈수에서의 난류유동을 계산하기 위해 k-ε 난류모형을 채용하였으며, 물체 근처에서는 벽법칙을 사용하였다. 선체의 3차원 형상을 효과적으로 처리하기 위해 물체적합좌표계를 이용하여 실제영역에서 유도된 지배방정식을 계산영역으로 변환시켰으며, 유한체적법을 사용하여 이산화시켰다. 압력 계산은 SIMPLE법을 사용하였으며, 이산화된 식들은 TDMA를 이용한 선순법으로 해를 구하였다. 실제 계산대상 선박은 4410 TEU급 콘테이너 운반선과 50,000 DWT급 살물 운반선으로 모형선 크기와 실선 크기에 대해 점성유동을 해석하여 비교하였으며, 모형선에 대해서 저항시험, 프로펠러 면에서의 반류분포 조사 시험, 그리고 한계유선 조사시험을 수행하여 계산결과와 비교 검토하였다. 계산결과는 선미 유동장에서의 평균속도와 압력 분포에 있어서 선미 형상에 따른 효과와 척도효과를 잘 묘사하고 있다. 특히, 계산된 프로펠러 면에서의 반류분포와 선체 표면에서의 한계유선 분포는 실험과 정성적으로 잘 일치하고 있으며, 점성저항 추정에 있어서는 실험 값과 ±5% 이내로 예측하고 있음을 보여 주고 있어 선형 개발의 설계 도구로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9)
접수일자 : 1996년 2월 3일, 재접수일자 : 1996년 5월 27일
* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소
** 경남대학교 기계공학과
*** 정회원, 서울대학교 기계공학과

Abstract

Viscous flow around actual ship is calculated by an use of RANS equations. The propriety of this computing method, usefulness to hull form design and the scale effect which is the effect of viscous flow depending on the scale of ship model are investigated. Reynolds stress is modelled by using k-ε turbulence model and the law of wall is applied near the body. Body fitted coordinates are introduced for the treatment of the arbitrary 3-dimensional shape of the ship hull form. The transformed equations in the computational domain are numerically solved by an employment of FVM. In the calculation of pressure, SIMPLE method is adopted and the solution of the discretized equation is obtained by the line-by-line method with the use of TDMA. The calculations of two ships, 4410 TEU container carrier and 50,000 DWT class bulk carrier, are performed at model and actual ship scale. The results are compared and discussed with the model test results which are viscous resistance, nominal wake distribution at propeller plane and limiting streamline on the hull surface. They describe the effect of stern form and the scale effect very well. In particular, the calculated nominal wake distribution and limiting streamline are agreed qualitatively with the experiments and the viscous resistance values are estimated within ±5% difference from the resistance tests.

1. 서 론

선체 주위의 점성유동의 해석은 선체의 점성저항의 예측 및 각종 부가물의 설계를 위해서 매우 중요하다. 선체가 받는 저항은 비점성 성분인 조파저항과 점성에 기인한 점성저항 성분으로 나눌 수 있다. 일반적으로 저속선의 경우 점성저항 성분이 거의 대부분을 차지하며, 초고속선에서도 전체저항의 약 반 정도를 점성저항 성분이 차지하고 있다. 따라서, 추진성능이 우수한 선형을 개발하기 위해서는 저항의 감소 및 추진 효율의 향상이라는 측면에서 점성저항의 예측이 필수적이다. 현재 실제 선형의 점성저항을 예측하는데 사용되는 방법은 Schoenherr 곡선 또는 ITTC 경험식 등을 이용한 방법들이 있으나, 이러한 방법들은 주로 평판의 마찰저항에 근거한 것들로 점성저항의 정확한 예측은 불가능하다. 실제 선체가 받는 저항을 구하기 위해서는 선체 표면에 작용하는 압력과 마찰력을 적분해야만 구해질 수 있으며, 이를 위해서는 선체 주위의 압력과 속도 성분 등을 직접 구할 수 있는 점성 유동 해석이 선행되어야만 한다. 또한, 선미에서는 프로펠러를 비롯한 각종 부가물이 장치되어 선박을 추진하기 때문에 선미 부근에서 국부 점성유동 상태 및 프로펠러 면에서 반류분포의 예측은 선미에 붙는 각종 부가물의 설계에 중요한 설계자료가 되며, 따라서 선체의 저항 측면뿐만 아니라 선미의 각종 부가물의 설계를 위해서도 점성유동의 해석은 매우 중요한 설계기구가 된다.

1980년대 이후, 경계층 해석의 한계를 극복하기 위한 방법으로 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식을 사용하여 선체 주위 점성유동을 해석하려는 여러가지 방법들에 대한 연구가 선박유체역학 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이 방법은 난류유동의 지배방정식인 RANS방정식을 이용하여 전체 유동장을 점성유동 차원에서 해석하는 방법인데, 경계층 가정을 포함하지 않는다는 관점에서 많은 가능성을 보여주고 있다. 유동의 지배방정식을 직접 해석하기 때문에 경계층이론으로부터 무시된 여러 항들의 영향을 고려할 수 있고, 선미에서 일어나는 여러가지 유동 특성을 해석할 수 있다. 또한, 점성과 비점성의 특성이 강한 영역들을 구분하지 않고 전 영역을 해석하기 때문에 이들 영역들 사이의 상호작용을 자연스럽게 처리할 수 있으며, 이는 유동해석에 있어서 큰 장점이 된다.

최근에 Sweden에서 열린 SSPA-CTH-IIHR Ship Viscous Flow Workshop[1]과 Tokyo에서 개최된 CFD Workshop Tokyo 1994 [2]에 선체 점성유동 해석 분야의 연구 현황이 잘 요약되어 있다. SSPA-CTH-IIHR Workshop에서는 선미 부근에서 유동 형태가 다르게 나타나는 HSVA Tanker 선형과 Mystery Ship 선형에 대하여 19개 그룹에서 계산한 결과를 실험결과와 비교하여 발표하였다. 계산결과들을 보면 실험에서 나타나는 선미의 유동 특성을 정성적으로 잘 나타내 주었으며, 선체의 점성유동 해석이 선형 개발에 충분히 이용될 수 있음을 보여 주었다. 그러나 선형개발과 선체설계에 직접 이용될 수 있는 점성저항의 추정, 실선 주위의 점성유동 해석, 척도효과 등에 대한 결과는 거의 없었으며 이에 대한 논의도 이루어지지 않았다. 한편, 1994년 일본에서 열린 CFD Workshop Tokyo에서는 선박유체역학 전반에 걸쳐 여러가지 계산 결과가 발표되었다. 계산결과 중에는 자유표면 효과와 점성유동을 동시에 계산하여 계산한 경우도 있으며, 점성유동 해석 결과도 SSPA-CTH-IIHR Workshop에 발표된 결과와 비교하여 매우 향상되었고 그간 해석방법 개발에 상당한 발전이 있었음을 알 수 있었다. 특히, 선체의 점성저항 추정, 실선 레이놀즈수에 대한 계산결과들도 몇 편 발표되어 점성유동 해석이 선형 개발에 직접 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서는 선수 벌브와 선미 벌브를 갖는 비척도가 다른 2척의 실제 선형을 대상으로 모형선 크기와 실선 크기에 대해 RANS 방정식을 사용한 점성유동을 계산하였다. 이로부터 모형선 크기와 실선 크기에서의 점성저항 성분, 프로펠러 면에서의 반류분포, 그리고 선체 표면에서의 한계유선 등을 모형 실험치들과 비교 고찰하였다. 이는 실제 선형에 대한 RANS 방정식 계산방법의 타당성 및 선형 설계에의 적용 가능성을 입증하는 일이 되며, 모형선-실선 상관관계를 규명하기 위한 척도효과 연구의 기초 자료로 매우 중요하다고 생각한다.

2. 지배방정식 및 경계조건

2.1 운동량방정식 및 연속방정식

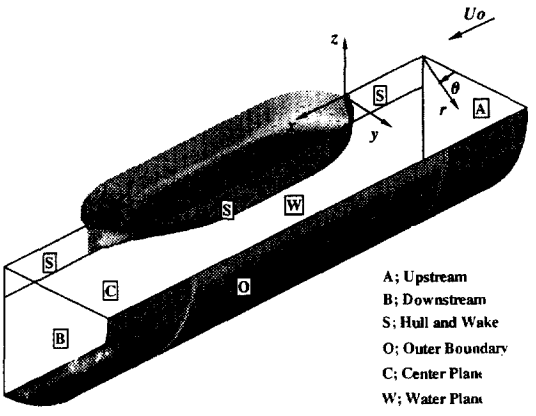

Fig. 1 Coordinate sstem in the pysical domain

선체와 주위의 유동영역을 Fig. 1에 나타내었다. 선체가 정수 중을 U_0의 속도로 움직이고 있으나 선체를 고정시키고 균일유동 U_0가 선체의 상류에서 하류로 흐른다고 생각한다. 본 연구에서는 선체와 유동을 나타내기 위해서 원통좌표계(x,r,θ)를 사용하였다. 유체의 유동을 지배하는 방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이며, 난류유동의 경우에는 레이놀즈응력을 포함하는 RANS방정식으로 나타낼 수 있다. 정상 비압축성 식유동을 가정하고, k-ε 난류모델을 도입하여 레이놀즈응력을 표시하면 연속방정식과 RANS방정식은 일반적으로 다음식으로 표현된다[3].

$$\frac{\partial}{\partial x}(U\phi) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV\phi) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(W\phi)$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}\right)$$
$$+ \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \theta}\right) + S_\phi \qquad (1)$$

여기서, ϕ는 유동변수 (U, V, W, k, ε)를 나타내고, $\Gamma\phi$는 유동변수 ϕ의 확산계수를, Sϕ는 생성항을 나타낸다. 임의의 3차원 형상 주위의 유동을 해석하기 위해서는 계산 영역상의 모든 경계면이 좌표면과 일치하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 일반 좌표계(general coordinate)에 기초한 물체적합좌표계(body fitted coordinate) (ξ, η, ζ)를 도입하였고, 이에 따른 지배방정식의 변환이 필요하다. 변환은 독립변수 (x,r,θ) 및 종속변수 (U, V, W, k, ε)를 계산영역 좌표계로 변환시킬 수도 있고, 임의의 좌표계에 대한 지배방정식을 따로 유도할 수도 있다. 그러나 여기서는 독립변수 (x,r,θ)만을 변환시키기로 한다. 즉, 종속변수 (U, V, W, k, ε)는 실제 영역인 원통좌표계에서 정의되고, 계산은 변환된 좌표계에서 이루어진다. 변환된 지배방정식은 다음과 같은 형태로 변환된다[3].

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial \xi}(G^1\phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(G^2\phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G^3\phi) \\
&= \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^3 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^1 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^2 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^3 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^1 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^2 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^3 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right)\Big] + J S'_\phi
\end{aligned} \tag{2}$$

여기서, Bij는 변환행렬의 곱 bjkbik로 주어지며, Gi는 ξi=const. 에 수직한 반변속도성분으로서 bijUj로 주어진다. 또한, S'ϕ는 식 (1)의 생성항 Sϕ를 변환시킨 형태로 표시된다.

2.2 경계조건

(1) 상류 경계면

상류 경계면은 선수로부터 선체의 길이만큼 떨어진 곳에 위치한다. 선체가 정수 중에서 U0의 속도로 움직이는 경우에 선체에서 보면 선체로부터 멀리 떨어진 곳에서 |U0|의 속력을 가진 균일유동(uniform flow)이 선수로 유입되는 경우와 같다. 또한, 선수로부터 멀리 떨어진 곳이므로 비점성유동으로 취급하여서 난류량은 영으로 놓을 수 있고, 교차격자계를 사용하기 때문에 계산상 압력 경계조건은 필요 없게 된다.

$$U = U_0, \quad V = W = k = \varepsilon = 0 \tag{3}$$

(2) 하류 경계면

하류 경계면은 선미로부터 선체의 길이만큼 떨어진 곳으로 정하였으며, 모든 유동 변수에 대하여 Neumann조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\partial V}{\partial \xi} = \frac{\partial W}{\partial \xi} = \frac{\partial k}{\partial \xi} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} = 0 \tag{4}$$

(3) 선체 표면

모형선의 경우는 벽 근처 로그속도분포지역(log-law region; $30 < y^+ < 400$)에 벽으로부터 첫 번째 격자점을 두어 벽법칙을 적용하였다. 실선의 경우에 레이놀즈수는 $10^9 \sim 10^{10}$으로 매우 크게 된다. 이 경우에 실선 레이놀즈수에 맞추어 격자점을 두는 것은 실제 계산에서는 불가능하고, 따라서 실선의 표면에서 어느 정도 위치에서 경계조건, 즉, 벽법칙을 적용시킬 수 있느냐가 실제적인 문제로 나타난다. 주상선과 Patel[5], 오건제와 강신형[6] 등의 연구 결과를 보면, 실선의 경우 $3000 \leq y^+ \leq 5000$ 정도에서 벽법칙을 사용하여 합리적인 결과를 얻을 수 있었으므로 본 연구에서도 실선의 경우 벽법칙이 만족되는 첫 번째 격자점의 위치를 이 정도로 설정하였다.

(4) 바깥 경계면

바깥 경계면은 반경방향으로 선체의 길이만큼 떨어진 곳으로 정하여 입구 경계면과 같이 속도 U_0를 가진 비점성 균일유동(uniform flow)으로 가

정하였다.

$$U = U_0, \quad W = k = \varepsilon = 0, \quad P = P_0 \qquad (5)$$

(5) 대칭면

원주방향속도는 영으로 놓았으며, 다른 유동 변수에 대해서는 대칭조건을 사용하였다.

$$W = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \zeta} = \frac{\partial V}{\partial \zeta} = \frac{\partial k}{\partial \zeta} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \zeta} = 0 \qquad (6)$$

(6) 후류 중심선

후류 중심선에서 반경방향 및 원주방향의 속도는 영으로 놓았으며, 다른 유동변수에 대해서는 후류 중심선에 대해서 대칭조건을 사용하였다.

$$V = W = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \eta} = \frac{\partial k}{\partial \eta} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} = 0 \qquad (7)$$

3. 수치해석 방법

지배방정식을 수치해석하기 위해서 검사체적(control volume)에 기초한 유한체적법을 사용하였다.[7] 이 방법은 계산영역을 구하려는 유동변수를 둘러싸고 있는 일정한 검사체적으로 나눈 후에, 지배방정식을 이 체적에 대해 적분함으로써 이산화시키는 방법이다. 이산화방정식은 변수의 격자점을 포함하는 각 검사체적에 대하여 지배방정식을 적분해서 유도되는데, 이 과정에서 변수가 정의되어 있지 않은 위치에서 변수 분포의 가정이 필요하다. 이 가정에 따라서 몇몇 수치해석 기법(numerical scheme)이 개발되어 있으며, 본 해석에서는 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics)기법을 사용하였다[8]. 이 기법을 사용하여 각 유동 변수의 검사체적에 대해서 지배방정식 (2)를 적분하면, 다음과 같은 형태의 이산화방정식을 얻을 수 있다[3].

$$a_P\phi_P = a_D\phi_D + a_U\phi_U + a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_E\phi_E + a_W\phi_W + \overline{S}_\phi \qquad (8)$$

여기서, aP는 현재점, aD, aU, aN, aS, aE, aW 등은 인근 격자점들의 이산화계수를 나타내며, $\overline{S}_\phi$는 이산화된 형태의 생성항을 나타낸다. 압력은 운동량방정식과 연속방정식을 만족하게끔 간접적으로 구해야 하는데, 본 연구에서는 Patankar-Spalding의 SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)법을 사용하였다[7]. 이 방법은 압력을 가정하여 운동량방정식을 해석한 후에 연속방정식을 만족하도록 압력과 속도를 보정해 주는 방법이다. 압력보정량에 대한 이산화방정식은 연속방정식으로부터 유도되며 식 (8)과 같은 형태로 나타난다.

4. 계산결과 및 검토

4.1 계산 대상의 선정 및 격자계의 구성

현대중공업(주)에서 실제 건조한 2척의 일반 상선 모형에 대하여 계산하였으며 계산결과를 모형시험 결과와 비교하였다. 계산 대상으로 선정된 2개의 선형은 T114B(4410 TEU급 콘테이너 운반선, C_B=0.5914), T149(50,000 DWT급 살물 운반선, C_B=0.8195)로 명명된 것으로 C_B 값의 차이로 인하여 선체 점성저항 성분의 전저항에 대한 비율이 서로 다르기 때문에 본 해석법의 타당성을 검증하기에 적절할 것으로 생각된다.

계산 격자계는 수치적으로 형성하였다. 격자계의 구성은 ξ, η, ζ방향으로 모두 121×30×42=152,460개의 격자점을 계산영역 내에 분포시켰다. 벽법칙이 적용되는 첫번째 격자점의 위치가 모형선의 경우 $y^+ \approx 30$ 정도였으며, 실선 계산의 경우 모형선과 같은 격자계를 사용하여 $3000 \leq y^+ \leq 6000$ 의 범위 내에 들었다.

Table 1 Comparison of vscous dag cefficients

Ship Type	T114B (4410 TEU C/C)		T149 (50K B/C)	
C_B	0.5914		0.8195	
Re (Model)	1.36E7		0.71E7	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
C_{PV}	0.614E-3	0.290E-3	0.976E-3	0.676E-3
C_{FV}	2.380E-3	2.846E-3	2.721E-3	3.186E-3
C_V	2.994E-3	3.136E-3	3.697E-3	3.862E-3
Re (Ship)	2.97E9		1.20E9	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
C_{PV}	0.522E-3	0.367E-3	0.543E-3	0.636E-3
C_{FV}	1.200E-3	1.343E-3	1.641E-3	1.497E-3
C_V	1.722E-3	1.710E-3	2.184E-3	2.133E-3

4.2 점성저항

T114B선에 대한 저항시험은 축척비 37.903의 목재로 만든 모형선에 대하여, T149선에 대한 저항시험은 축척비 28.358의 목재로 만든 모형선에 대하여 현대중공업(주) 선박해양연구소의 예인수조에서 실시되었다. 그 모형시험치들은 ITTC'78 방법에 의하여 실선 크기로 확장되었다. 여기서, 모형선과 실선의 마찰저항 성분인 C_{FM}과 C_{FS}는 다음과 같은 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선으로부터 추정하고 있다.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2}$$

계산에 의한 점성저항성분(C_V)은 점성압력저항성분(C_{PV})과 점성마찰저항 성분(C_{FV})을 더함으로써 구할 수 있으며, C_{PV}는 압력에 기인한 힘의 축방향 성분을 선체표면에 따라서 적분하고 CFV는 마찰력의 축방향 성분을 선체 표면에 따라서 적분함으로써 구할 수 있다. Table 1에는 두 척의 선박에 대하여 계산과 실험에 의한 점성저항 성분들을 정리하였다. 실험치에서의 C_{PV}값은 모형선에서는 KC_F (여기서, K는 형상계수)값을 실선에서는 $KC_F+\triangle C_F$ (여기서, $\triangle C_F$는 표면거칠기로 인한 상관값)값을 나타내고, C_{FV}값은 위의 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선에서 추정한 C_F값을 나타낸다. 따라서, 성분별로 정확한 비교는 되지 않지만 전체 점성저항을 살펴보면, 두 척 모두 모형선에서는 계산치의 C_V값이 실험치의 그것보다 약간 작고, 실선에서는 계산치의 C_V값이 실험치의 그것보다 약간 큰 값을 나타내고 있으나, 모두 다 ± 5% 이내의 오차를 보이고 있어 실제 선형 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. C_{FV} 값만을 계산치와 실험치로 비교하여 볼 때, 대부분 모두 계산치가 실험치 보다 약간 작은 값을 나타내고 있으나, 비대선형인 살물선에 있어서 실선의 경우에만 계산치가 위의 상관곡선 추정치 보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 이는 유동박리(separation)나 빌지보텍스의 영향을 위의 상관곡선은 무시하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 모형선과 실선 주위의 압력분포

Fig. 2와 Fig. 3에 두 선형에 대한 선체표면의 압력분포를 압력계수(pressure coefficient)를 이용하여 도시하였는데, 선체 표면을 따른 압력 변화의 특성을 잘 나타내 주고 있다. 압력분포를 보면 두 선형에 따라 서로 다른 특성을 보여주고 있다. C_B가 증가함에 따라 선체에 나타나는 최소 압력의 크기가 작아지면서, 최소 압력이 나타나는 위치가 선수쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. C_B가 작은 T114B 선형의 경우 수선(water line) 상에서 최소압력이 나타나는 위치는 선체의 중간부이며, C_B가 매우 큰 T149 선형의 경우 선수 부근에서 최소압력이 나타나고 선체 중간부에서는 거의 대기압으로 회복되고 있음을 알 수 있다. 실선과 모형선의 경우를 비교하면 압력 변동이 심한 선수와 선미 부근에서 약간 차이를 보이고 있지만 전반적으로 큰 차이는 없으며 거의 같은 경향을 보이고 있다.

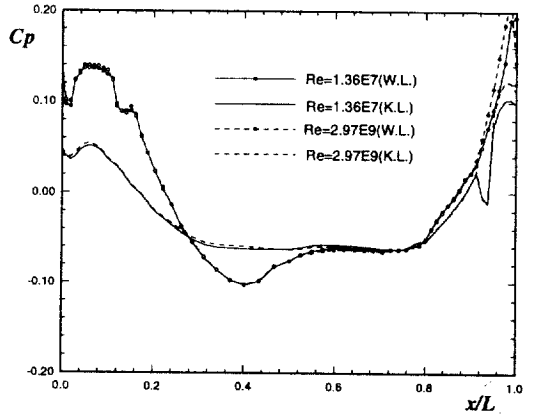

Fig. 2 Pressure cefficient distribution along the water line and keel line for 4,410 TEU container carrier

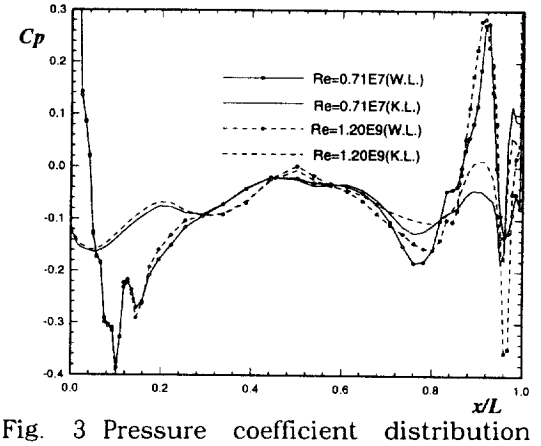

Fig. 3 Pressure coefficient distribution along the water line and keel line for 50,000 DWT bulk carrier

4.4 프로펠러 면에서의 반류분포

모형선에 대한 프로펠러 면에서의 축방향 반류분포 조사 시험은 2홀 피토관(2-hole Pitot tube)에 의해 실시되었으며, 그 반류분포 조사 시험 결과들은 simplified Sasajima-Tanaka 방법[9]에 의해 실선의 그것들로 확장되었다. Fig. 4와 Fig. 5에 콘테이너선에 대한 계산과 실험 결과들을 각각 나타내었고, Fig. 6과 Fig. 7에 살물선에 대한 계산과 실험 결과들을 각각 나타내었다. 콘테이너선에 대한 모형선에서의 반류분포는 계산과 실험이 정성적으로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 비

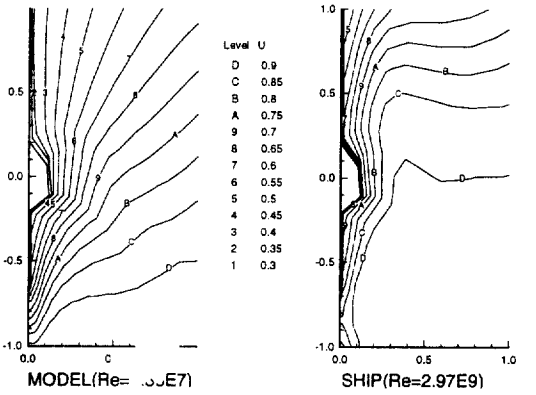

Fig. 4 Axial wake distribution at propeller plane for 4,410 TEU container carrier (Calculation)

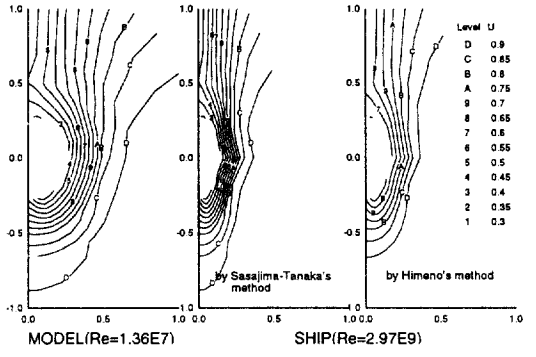

Fig. 5 Axial wake distribution at propeller plane for 4,410 TEU container carrier (Experiment)

대선인 살물선에 대한 그것은 계산에서는 실험에서 나타나는 'hook' 현상을 명확히 잡아내지 못하고 있다. 이 'hook' 현상의 원인은 난류모델인지, 격자분포인지, 수치 기법인지 아직 밝혀지지 않고 있다. 한편, simplified Sasajima-Tanaka 방법에 의해 확장된 실선의 반류분포는 계산과 비교하여 볼 때 너무 과장되게 경계층이 얇아진 결과를 보이고 있으며, 등속선 분포 자체도 많이 다름을 알 수 있다. 이는 마찰반류 성분의 두께가 실선의 C_{FS}와 모형선에서의 C_{FM}의 비율로 줄어든다고 가정한 것이 너무 과장되어 있고, 유동속도 그 자체에 대한 척도효과는 고려하지 않았기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 그 방법보다는 Tanaka 외

[10]에서 Himeno가 제안한 바와 같이 3차원 물체에서는 반류의 두께가 실선의 C_{FS}와 모형선의 C_{FM} 비의 0.7승의 비율로 줄며, 반류값 자체도 1/2승 비율로 줄어든다고 가정하는 것이 계산결과를 고려해 볼 때 더 합리적이라는 것을 짐작할 수 있다.

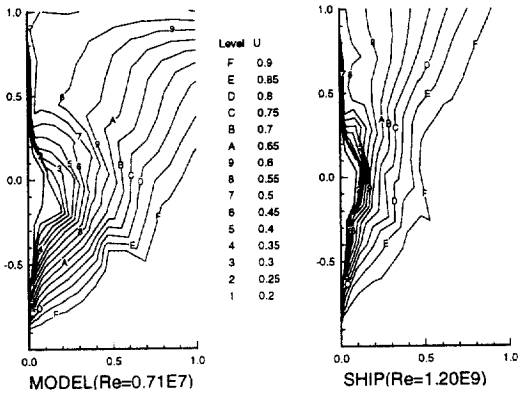

Fig. 6 Axial wake distribution at propeller plane for 50,000 dwt bulk carrier (calculation)

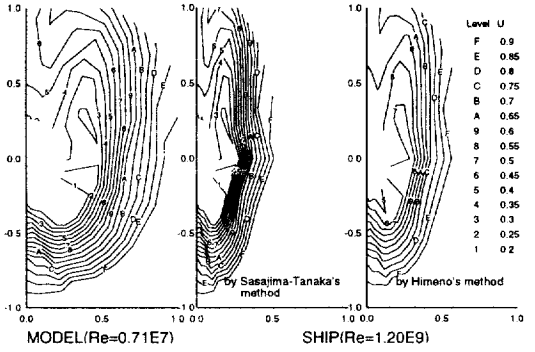

Fig. 7 Axial wake distribution at propeller plane for 50,000 dwt bulk carrier (experiment)

4.5 선체표면의 한계유선 분포

선체표면에서의 한계유선은 선형 개선의 자료로 활용될 뿐만 아니라 빌지 킬(bilge keel)의 위치를 결정하는 있어서 매우 중요하다. 콘테이너선에 대해서 계산과 페인트법에 의한 한계유선의 분포 모습을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 보였으며, 살물선에 대한 그것들은 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 보였다. 계산과 실험이 정성적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 선수부에서의 유선을 살펴보면 살물선에서는 빌지 아래쪽으로 짧고 급격하게 돌아 나가는 반면 콘테이너선에서는 길고 완만하게 돌아 나가고, 선미부의 유선을 살펴보면 콘테이너선은 상대적으로 비교적 균일하게 흘러 나가는 반면 살물선은 유선이 트랜섬(transom) 밑부분과 프로펠러 허브(hub)부분으로 뭉쳐져 나감을 보여 주고 있다.

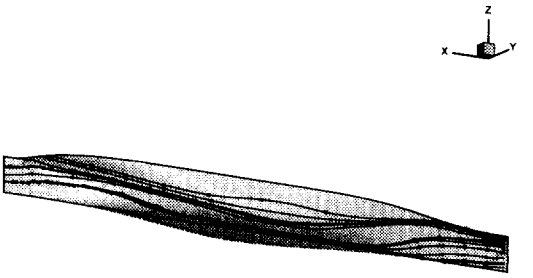

Fig. 8 Streamline distribution on ship surface for 4,410 teu container carrier

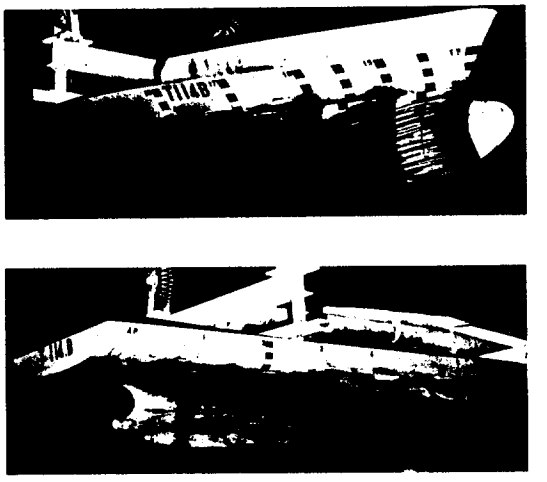

Fig. 9 Photos of paint test results for 4,410 teu container carrier

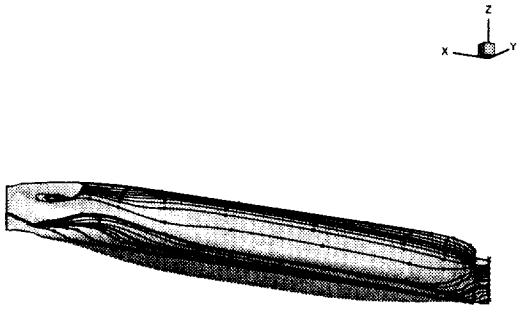

Fig. 10 Streamline distribution on ship surface for 50,000 dwt bulk carrier

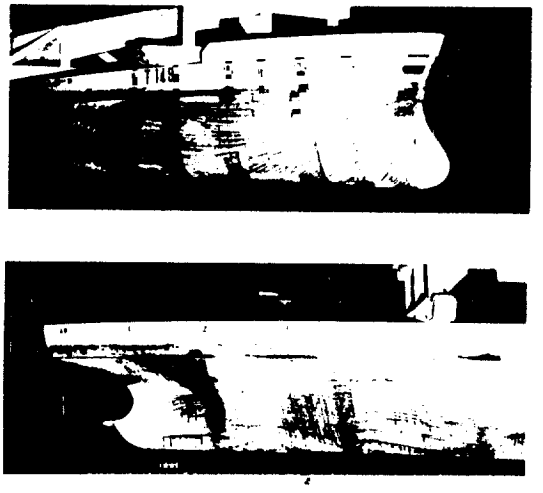

Fig. 11 Photos of paint test results for 50,000 dwt bulk carrier

5. 결 론

본 연구에서는 실제 선박에 대한 점성유동을 정확히 예측하기 위하여 RANS 방정식의 해를 모형선과 실선에 대해 수치적으로 해석하였으며, 점성저항, 프로펠러 면에서의 반류 분포, 그리고 선체 표면에서의 한계유선 등을 모형시험 및 그 실선 추정치와 비교, 고찰함으로써 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 선수 벌브, 선미 벌브 및 프로펠러 허브(hub) 등 복잡한 3차원 형상을 갖는, 비척도가 다른 2척의 실제 선형에 적용한 결과, 속도 및 압력 분포 등이 합리적으로 예측되었다. 따라서 본 연구에서의 방법이 수학적 선형이 아닌 일반 선형에 효율적으로 적용될 수 있으며, 선형 개발이나 기타 부가물의 설계 등에 활용될 수 있는 가능성을 보여 주었다.

2) 모형선에서 실선으로 가면서 마찰저항계수 성분은 크게 감소하나 압력저항계수 성분의 감소는 상대적으로 작았다. 레이놀즈수가 큰 경우에 선미에서의 압력 회복량이 약간 더 커짐을 볼 수 있었다. 선형간의 저항 성능의 차이는 주로 압력저항 성분에서 나타나며, 실험에 있어서는 그 경향이 실선에서도 그대로 유지되었다.

3) 계산에 의한 점성저항계수를 실험치 및 ITTC '78 방법에 의한 그 실선 추정치와 비교하여 ±5% 이내의 오차로 정확하게 예측할 수 있었다. 마찰저항성분 만을 비교했을 때 계산치가 ITTC 1957년 모형선-실선 상관곡선 보다 약간 작은 값들을 주고 있으나, 유동박리(separation)나 강한 빌지 보텍스가 일어나는 비대선의 실선 경우에는 계산치가 상관곡선 보다 약간 큰 값을 주고 있음을 알 수 있었다.

4) 프로펠러면에서의 축방향 반류분포에 대한 척도효과를 살펴보기 위해 모형실험에서의 반류분포를 실선에서의 그것으로 확장하는 경험적인 방법들과 본 계산 결과들과 비교하였다. 반류 영역의 두께만 고려하는 Sasajima-Tanaka방법보다는 두께뿐만 아니라 유속 성분에 대한 척도효과까지 고려하는 Himeno의 방법이 본 계산 결과들과 더욱 정성적으로 가까운 것을 확인할 수 있었다.

5) 본 연구에서는 CFD를 이용하여 실제 선박에 대해서 자유표면을 무시하고 이중모형에 대해 계산을 수행하여, 유동장을 해석하고 레이놀즈수에 따른 척도효과를 살펴보았다. 앞으로, 선수 벌브

및 프로펠러 허브(hub)부분 등 복잡한 3차원 형상을 좀 더 정확히 표현할 수 있는 격자생성 방법 연구와 자유표면을 포함하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Larsson, L., Patel, V.C., and Dyne, G., "Ship Viscous Flow : Proceedings of 1990 SSPA-CTH-IIHR Workshop", FLOWTECH INTERNATIONAL AB, Gothenburg, Sweden, 1991.

[2] Proccedings of CFD Workshop Tokyo 1994, Tokyo, Japan, 1994.

[3] 오건제, "선미 주위의 점성유동에 관한 수치해석적 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 서울대학교, 1989.

[4] Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K., TEACH-2E Computation Code Manual, Dept. of Mechanical Eng., Imperial College, England, 1976.

[5] Ju, S. and Patel, V.C., "Stern Flows at Full-Scale Reynolds Number", J. Ship Research, Vol.35, No.2, 1991.

[6] Oh, K. and Kang, S., "Full Scale Reynolds Number Effects for the Viscous Flow around the Ship Stern", Computational Mechanics, Vol.9, No.2, 1992.

[7] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Mcgraw-Hill, 1980.

[8] Hayase, T., Humphrey, J.A.C. & Grief, R., "A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedures", JCP, Vol. 98, 1992.

[9] Sasajima, H. and Tanaka, I., "On the Estimation of Wake of Ships", Proc. of 11th ITTC, 1966.

[10] Tanaka, I., "Scale Effects on the Wake Distribution and Viscous Pressure Resistance of Ships", Jour. Soc. Nav. Arch. Japan, No. 146, 1979.