

## 수치해를 이용한 선박의 점성저항 해석

곽 영 기\*  
(97년 2월 28일 접수)

### Viscous Resistance Analysis of a Ship Using Numerical Solutions

Young-Ki Kwak\*

**Key Words** : RANS equation(RANS 방정식),  $k-\epsilon$  turbulence model( $k-\epsilon$  난류모형), body fitted coordinates(물체적합좌표계), Finite Volume Method(유한체적법), SIMPLE method(SIMPLE법), viscous resistance(점성저항), geosim model(상사모형), form factor(형상계수)

#### Abstract

Viscous flow around an actual ship is calculated by an use of RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) solver. Reynolds stress is modelled by using  $k-\epsilon$  turbulence model and the law of wall is applied near the body. Body fitted coordinates are introduced for the treatment of the complex boundary of the ship hull form. The transformed equations in the computational domain are numerically solved by an employment of FVM(Finite Volume Method). SIMPLE(Semi-Implicit Pressure Linked Equation) method is adopted in the calculation of pressure and the solution of the discretized equation is obtained by the line-by-line method with the use of TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm).

The subject ship model of actual calculation is 4,410 TEU class container carrier. For 4 geosim models the calculated viscous resistance values are compared with the model test results and analyzed on their components. The resistance performance of an actual ship is predicted very reasonably, so this method may be utilized as a design tool of hull form.

#### 1. 서 론

1980년대 이후, 경계층 해석의 한계를 극복하기 위한 방법으로 RANS방정식을 풀어서 선체 주위 점성유동을 해석하려는 연구가 선박유체역학 분

야에서 활발히 진행되고 있으며, 1990년 Sweden에서 열린 SSPA-CTH-IIHR Ship Viscous Flow Workshop<sup>1)</sup>과 1994년 개최된 CFD Workshop Tokyo 1994<sup>2)</sup>에 그 연구 현황이 잘 요약되어 있다. SSPA-CTH-IIHR Workshop에서의 계산결과

\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

들을 보면 실험에서 나타나는 선미의 유동 특성을 정성적으로 잘 나타내 주었으며, 선체의 점성유동 해석이 선형 개발에 충분히 이용될 수 있음을 보여주었다. 한편, 1994년 일본에서 열린 CFD Workshop Tokyo에서의 점성유동 해석 결과는 프로펠러면에서의 반류분포 등을 살펴 볼 때, SSPA-CTH-IIIHR Workshop에 발표된 결과와 비교해서 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.

선박에 대한 모형선 저항시험 결과들은 적절한 방법을 통해 실선으로 확장되어야 한다. 모형시험 결과를 실선으로 확장하는 방법들 중에서 세계의 각 수조에서 가장 많이 쓰이고 있는 방법들로는 전 체저항을 평판에 대한 마찰저항과 잉여저항으로 분리하는 Froude가 제안한 전통적인 방법과 3차원 형상의 효과를 고려하기 위하여 Hughes의 형상계수(form factor) 개념을 도입한 ITTC'78 방법 등이 있다. Froude의 방법에는 잉여저항 성분내에 점성에 관련된 압력저항이 포함되어 있으며, ITTC'78 방법에 있어서는 1990년 19차 ITTC Powering Performance Committee 보고서<sup>3)</sup>에도 언급되었듯이 형상계수 결정에 대한 의문점들이 지적되고 있다. 또한, 두 방법 모두 실선 확장 과정에서 경험적인 수정을 가해 주어야 하는 단점을 안고 있다. 이러한 어려움을 극복하고자 하는 노력이 계산유체 역학(CFD) 분야에서 시도되고 있으며 앞서 언급한 1994년 CFD Workshop Tokyo<sup>2)</sup>에서 어느 정도 가능성을 보여 주는 결과들이 보여진 바 있다. 본 연구에서는 모형선-실선 상관관계를 규명하기 위한 기초 연구로 4,410 TEU급 컨테이너 운반선을 대상으로 네 척(2m, 4m, 7m, 8m 크기)의 상사 모형선들에 대하여 저항시험을 실시하고, RANS solver로 계산한 결과들을 모형시험 결과들과 비교하고 고찰하였다.

## 2. 지배방정식 및 경계조건

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 선체 주위의 유동장을 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 비압축성유동을 가정하고, k-ε 난류모델을 도입하여 레이놀즈응력을 표시하면 연속방정식과 RANS방정식은 일반적으로 다음식으로 표현된다<sup>3)</sup>.

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

여기서, ϕ는 유동변수 (U, V, W, k, ε)를 나타내고, Γ<sub>ϕ</sub>는 유동변수 ϕ의 확산계수를, S<sub>ϕ</sub>는 생성항을 나타낸다. 임의의 3차원 물체 주위의 유동을 해석하기 위해서는 계산 영역상의 모든 경계면이 좌표면과 일치하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 일반 좌표계에 기초한 물체적합좌표계 (ξ, η, ζ)를 도입하였고, 이에 따른 지배방정식의 변환이 필요하다. 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<sup>4)</sup>.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi}(G^1\phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(G^2\phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G^3\phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^3 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^1 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^2 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^3 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_3^1 \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_1^2 \frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \zeta}\left(\frac{\Gamma_\phi}{J} B_2^3 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right) + J S_\phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, B<sub>ij</sub>는 변환행렬의 곱 b<sub>ik</sub>b<sub>jk</sub>로 주어지며, G<sup>i</sup>는 ξ<sub>i</sub>=const. 에 수직한 반변속도 성분으로서 b<sub>ij</sub>U<sub>j</sub>로 주어진다. 또한, S'<sub>ϕ</sub>는 식 (1)의 생성항 S<sub>ϕ</sub>를

변환시킨 형태로 표시된다.

## 2.2 경계조건

상류 경계면은 선수로부터 선체의 길이만큼 떨어진 곳에 위치한다. 선체가 정수 중에서  $U_0$ 의 속도로 움직이는 경우에 선체에서 보면 선체로부터 멀리 떨어진 곳에서  $|U_0|$ 의 속력을 가진 균일유동(uniform flow)이 선수로 유입되는 경우와 같다. 또한, 선수로부터 멀리 떨어진 곳이므로 비점성유동으로 취급하여서 난류량은 영으로 놓을 수 있다( $U=U_0, V=W=k=\epsilon=0$ ). 하류 경계면은 선미로부터 선체의 길이만큼 떨어진 곳으로 정하였으며, 모든 유동 변수에 대하여 Neumann조건을 사용하였다. 모형선의 경우는 벽 근처 로그속도 분포지역(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 있는지가 실제적인 문제로 나타난다. 주상선과 Patel<sup>6)</sup>, 오건제와 강신형<sup>7)</sup> 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. 바깥 경계면은 반경방향으로 선체의 길이만큼 떨어진 곳으로 정하여 입구 경계면과 같이 속도  $U_0$ 를 가진 비점성 균일유동으로 가정하였다( $U=U_0, W=k=\epsilon=0, P=P_0, P_0$ 는 기준압력을 뜻함). 대칭면에서 원주방향속도는 영으로 놓았으며, 다른 유동 변수에 대해서는 대칭조건을 사용하였다. 후류 중심선에서 반경방향 및 원주방향의 속도는 영으로 놓았으며, 다른 유동변수에 대해서는 후류 중심선에 대해서 대칭조건을 사용하였다.

## 3. 수치해석 방법

지배방정식을 수치해석하기 위해서 검사체적에 기초한 유한체적법(FVM)을 사용하였다<sup>8)</sup>. 이 방법

은 계산영역을 구하려는 유동변수를 둘러싸고 있는 일정한 검사체적으로 나눈 후에, 지배방정식이 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 기법이 개발되어 있으며, 본 해석에서는 QUICK기법을 사용하였다<sup>9)</sup>. 이 기법을 사용하여 각 유동 변수의 검사체적에 대해서 지배방정식 (2)를 적분하면, 다음과 같은 형태의 이산화방정식을 얻을 수 있다<sup>4)</sup>.

$$a_P \phi_P = a_D \phi_D + a_U \phi_U + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + \bar{S}_\phi \quad (3)$$

여기서,  $a_P$ 는 현재점,  $a_D, a_U, a_N, a_S, a_E, a_W$  등은 인근 격자점들의 이산화계수를 나타내며,  $\bar{S}_\phi$ 는 이산화된 형태의 생성항을 나타낸다. 압력은 운동량방정식과 연속방정식을 만족하게끔 간접적으로 구해야 하는데, 본 연구에서는 Patankar-Spalding의 SIMPLE법을 사용하였다<sup>8)</sup>. 이 방법은 압력을 가정하여 운동량방정식을 해석한 후에 연속방정식을 만족하도록 압력과 속도를 보정해 주는 방법이다. 압력보정량에 대한 이산화방정식은 연속방정식으로부터 유도되며 식 (3)과 같은 형태로 나타난다.

## 4. 계산결과 및 검토

### 4.1 대상 선형

대상 선형은 방형비척계수( $C_B$ )가 0.5914로 매우 날씬한 선형이며 비교적 높은 선수 벌브를 갖고 있고, 설계속도는 26.0 Knots(프루드수 0.263)로 고속에 속하며 선미벌브를 갖고 있는 4,410 TEU급 컨테이너 운반선이다. 이 선박에 대한 저항시험들은 현대 선박해양연구소의 예인수조(길이 × 폭 × 깊이 = 210m × 16m × 6m)에서 실시하였으며, 계산은 IBM 9076-SP1에서 수행하였다.

계산 상의 격자계는 2장에서 설명한 물체적합좌

표계를 사용하여 수치적으로 형성하였다. 주유동방향(x 방향)으로는 121개의 격자를 두었고, 반경방향(r 방향)으로는 벽면에서 바깥경계( $r/L=1.0$ )까지 30개의 격자를 두었으며, 원주방향( $\theta$  방향)으로는 대칭면을 처리하기 위한 계산영역 외부의 2개의 격자를 포함하여 42개의 격자를 분포시켰다. 또한, 주유동방향으로 선형이 급격히 변화하는 선수미 부분과 유동의 변화가 극심한 벽면 근처에는 상대적으로 조밀한 격자를 사용하였다. 따라서, 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.

#### 4.2 저항시험 결과들과의 비교

4,410 TEU급 컨테이너선에 대한 저항시험은 각각 축척비 131.5(2m 크기), 65.75(4m 크기), 37.903(7m 크기) 그리고 32.875(8m 크기)의 목재로 만든 상사 모형선들에 대하여 현대중공업(주) 선박해양연구소의 예인수조에서 실시하였다. 네 척의 모형선들에 대한 예인수조 저항시험에 있어서 일관성을 유지하기 위하여 저항동력계는 독일 K&R사의 R56(100N용량)을 모두 사용하였다. 그 모형 시험치들은 ITTC'78 방법에 의하여 실선크기로 확장되었다.

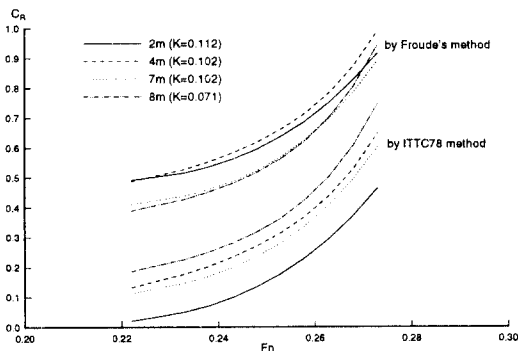


Fig. 1  $C_R$  curves comparison by Froude's and ITTC'78 method

Fig. 1에는 네 척의 모형선 저항시험 결과 중에서 Froude의 방법에 의한 잉여저항( $C_R$ )과 ITTC'78

방법에 의한 조파저항( $C_w$ )을 비교하여 표시하였다. 앞서 지적된 바와 같이 Froude 방법에 의한  $C_R$  곡선들은 모형선 크기에 따라서 점성압력저항 성분들이 포함되어 서로 다른 기울기들을 보여 주고 있으며, ITTC'78 방법에 의한  $C_w$  곡선들은 모형선 크기에 따라서 거의 같은 기울기를 보여 주고 있으나 형상계수가 다름에 따라 그 값에 있어서 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 실선의 유효마력(EHP)에 있어서는 작게는 5% 정도에서 크게는 10% 정도까지의 차이를 주고 있지만, ITTC'78 방법에서의  $C_w$  곡선들은 점성압력저항 성분을 포함하고 있지 않기 때문에 형상계수만 정확히 예측될 수 있다면 2차원 방법인 Froude 방법보다는 훨씬 좋은 실선 확장방법이라는 사실을 알 수 있다.

ITTC'78 방법에서는 형상계수를 추정하는데 있어서 마찰저항곡선으로 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선을 사용하며, Prohaska 방법에 기반을 두고 있다. 이 방법에 의해 구한 형상계수 값들은 2m 모형선에서는 0.112, 4m와 7m 모형선에서는 0.102 그리고 8m 모형선에서는 0.071의 값을 보이고 있다. 이렇게 얻어진 형상계수는 4m 모형선과 7m 모형선에서는 같은 값을 주고 있으나, 2m 모형선에서는 약간 큰 값을 주고 있고 8m 모형선에서는 약간 작은 값을 주고 있다. Hughes의 기본 가정은 형상계수는 기하학적으로 상사한 모형선에서 크기에 관계없이 일정하다는 것을 전제로 하고 있으나 계측된 결과는 가정과는 다르게 나타났다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 네척의 상사 모형선들에 대한 저항시험 결과들을 Telfer의 방법을 준용하여 Fig. 2에 도시하여 보았다. 일정한 프루드수( $F_n$ )를 갖는 점들을 최소자승법(least square method)에 의하여 구한 직선의 기울기로부터 형상계수를 얻을 수 있으며, 이렇게 얻어진 형상계수 값들을  $F_n$ 에 따라서 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 살펴보면 형상계수는 모든 속도 범위에 걸쳐서 일정한 값을 갖는 것으로 보는 Hughes의 가정과는 다르게 프루드수가 커질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 단일값을 택하기 위하여 전체를 평균해서 형상계수를 구하면 0.1057이 되고, 이는 앞서 ITTC'78 방법에 의해 구한 4m와 7m 모형선들의 형상계수 값 0.102보다 약간 큰 값을 주는 것으로

나타나고 있다.

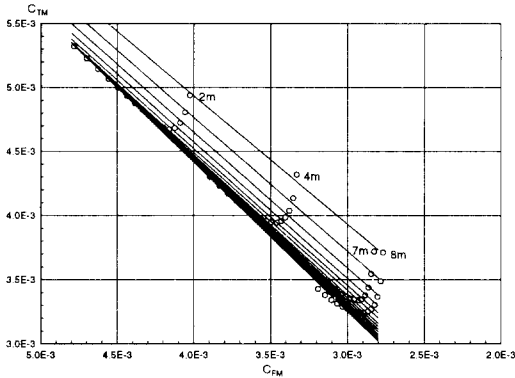


Fig. 2  $C_{TM}$  vs.  $C_{FM}$  graphs by Telfer's method

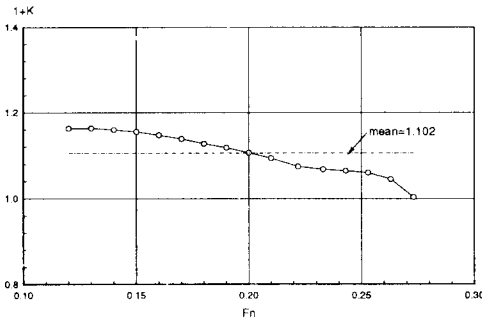


Fig. 3  $(1+K)$  vs.  $F_n$  curve from Telfer's method

Fig. 4에는 마찰저항 성분( $C_F$ )에 대해서 모형선 네 척과 실선의 한 속도에 대한 계산치를 ITTC'57 모형선-실선 상관곡선과 비교하여 도시하였다. 여기서 살펴보면, 레이놀즈수가  $5 \times 10^6$  정도보다 작은 구간에서는 계산치가 상관곡선보다 급한 기울기를 갖는 것으로 나타났다. 이는 상관곡선을 사용하여 Prohaska 방법에 의해 추정된 형상계수 값이 작은 모형선, 즉 위의 낮은 레이놀즈수 범위 내일때 큰 값을 갖는 현상과 수리적으로 같은 의미를 갖는다. 그러므로 이 결과에 의하면, Hughes가 가정한 바와 같이 레이놀즈수에 관계없이 같은 형상계수를 가지려면 작은 모형선 범위에서 Schoenherr 곡선에 더 급한 기울기를 주도록 수정된 ITTC'57 상관곡선이 보다 조금 더 급한 기울기를 가져야 하는 것을 뜻하고 있다.

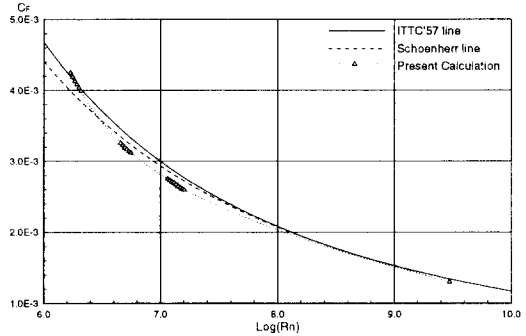


Fig. 4 Calculated  $C_F$  comparison with ITTC'57 line

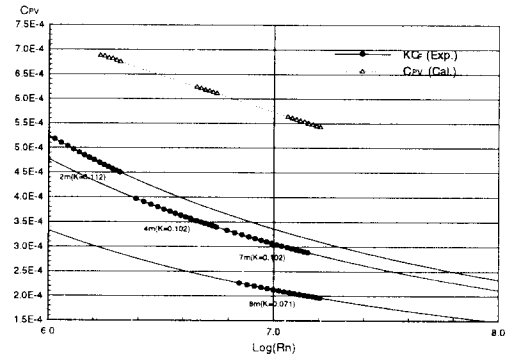


Fig. 5 Calculated  $C_{PV}$  comparison with  $KC_F$  of experiments

Fig. 5에는 모형선 네 척에 대해서 계산한 점성 압력저항 성분( $C_{PV}$ )과 저항시험에서의  $KC_F$ (여기서,  $K$ 는 형상계수) 값들을 비교하여 나타내었다. 레이놀즈수에 따라서 계산에서의  $C_{PV}$  값들은 기울기가 일정한 한 곡선상에 있게되나, 실험에서의  $KC_F$  값들은 형상계수  $K$  값에 따라 서로 다른 기울기를 갖는 곡선상에 있음을 보여 주고 있다. 여기서도 2m 모형선의 형상계수  $K=0.112$  값이 너무 크게 추정된 것을 알 수 있으며, 8m 모형선의 경우는 형상계수  $K=0.071$  값이  $KC_F$  곡선 기울기가 계산치보다 약간 완만한 것으로 보아 약간 작은 값인 것으로 생각된다. 한편, 4m 모형선과 7m 모형선의  $KC_F$  값이 같은 곡선상에서 계산의  $C_{PV}$  곡선 기울기와 잘 일치하고 있어서, 형상계수가 모형선의 크기나 프루드수에 관계없이 일정하다는 조건을 충족

시키는 값으로 Prohaska법과 Telfer법의 평균값이라고 생각되는 0.102가 이 콘테이너선의 형상계수로서 가장 적절한 것으로 판단할 수 있다.

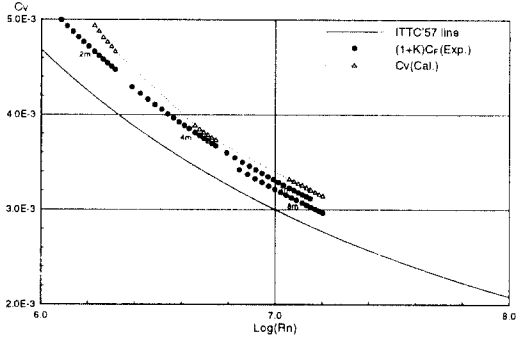


Fig. 6 Calculated  $C_v$  comparison with  $(1+K)C_f$  of experiments

Fig. 6에는 모형선 네 척에 대해 계산한 점성저항 성분( $C_v$ )들과 저항시험에서의  $(1+K)C_f$  값들을 비교하여 나타내었다. 레이놀즈수가 작은 범위인 2m 모형선의 경우는 Fig. 4에서 살펴 본 바와 같이 계산에서의 마찰저항 성분( $C_f$ )이 실험에서 사용하고 있는 상관곡선보다 크게 나타난 영향으로 계산에서의  $C_v$  값들이 실험에서의  $(1+K)C_f$  값들보다 크게 나타났으며, 레이놀즈수가 비교적 큰 8m 모형선의 경우는 앞서 Fig. 5에서 살펴 본 바와 같이 실험에서의 형상계수 K 값이 작게 추정된 영향으로 실험에서의  $(1+K)C_f$  값들이 계산에서의  $C_v$  값들보다 작게 나타났다.

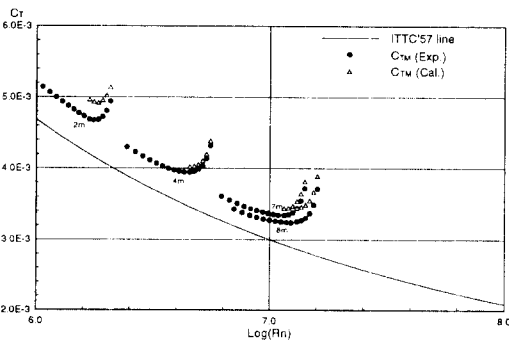


Fig. 7 Calculated  $C_{TM}$  comparison with experiments

Fig. 7에는 모형선 네 척에 대해서 계산한 점성저항 성분( $C_v$ )들에 실험에서 얻은 잉여저항( $C_R$ ) 값들을 더하여 저항시험에서의 전체저항( $C_T$ ) 값들과 비교하여 표시하였다. 레이놀즈수가 작은 범위인 2m 모형선의 경우와 레이놀즈수가 비교적 큰 8m 모형선의 경우는 앞서 Fig. 6에서와 마찬가지로의 이유로 계산 값들과 실험 값들이 차이를 보이고 있으며, 4m 모형선과 7m 모형선의 경우는 계산과 실험이 비교적 잘 일치하고 있는 것을 살펴 볼 수 있다.

## 5. 결론

선박의 선형 설계에서 필요로 하는 점성유동 정보를 이론적으로 비교적 정확히 추정할 수 있는 수치해법을 마련하는 것을 목적으로 RANS 방정식에  $k-\epsilon$  난류모형과 벽법칙을 채용하여 해석하는 방법을 사용하였다. 실제 선박인 4,410 TEU 급 콘테이너 운반선에 대해서 네 척의 상사 모형선들을 제작하여 이들을 선형시험수조에서 실험하고, 수치 계산 값들을 그 결과들과 비교하여 해의 유용성을 확인하고자 하였으며, 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 선수 벌브, 선미 벌브 및 프로펠러 허브(hub) 등 복잡한 3차원 형상을 갖는 실제 선형의 마찰저항을 예측함에 있어서 제안된 해석법은 합리적인 결과를 주고 있다.

2) 모형선의 저항시험 결과를 실선으로 확장할 때 쓰이고 있는 ITTC'78 방법의 핵심이 되는 형상계수를 Telfer법에 의하여 상사 모형시험으로부터 구하고 이를 Prohaska법으로 구한 형상계수와 비교하면, 당연구소의 예인수조에서는 4~7m 모형선에서 적절한 형상계수를 추정할 수 있는 것이 확인되었다.

3) 콘테이너선의 상사 모형선 네 척에 대하여 수치해석하여 얻어진 마찰저항계수를 ITTC 1957년 모형선-실선 상관곡선과 비교하면, 낮은 레이놀즈수 영역에서는 수치 계산 결과가 ITTC'57 상관곡선보다 더욱 급한 기울기를 가지며 절대값도 크게 나타났다. 이는 ITTC'57 상관곡선이 작은 모형선에서 마찰저항을 작게 평가하는 것을 뜻하며, 작

은 모형선에서 Prohaska법으로 추정되는 형상계수 값이 과대하게 평가되는 원인이 되고 있다.

4) 제안된 수치 해석법에서는 자유 수면의 영향이 고려되어 있지 못하므로 앞으로 이에 대한 연구가 필요하며, 실선 계측 및 실선 시운전 자료 등을 바탕으로 계산 정도를 검증 개선하는 연구가 후속되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- 1) Larsson, L., Patel, V.C., and Dyne, G., "Ship Viscous Flow : Proceedings of 1990 SSPA-CIT-IIIHR Workshop", FLOWTECH INTERNATIONAL AB, Gothenburg, Sweden, 1991
- 2) Proceedings of CFD Workshop Tokyo 1994, Tokyo, Japan, 1994
- 3) ITTC, "Report of the Powering Performance Committee", Proc. of 19th ITTC, Madrid, Spain, Vol. 1, 1990
- 4) 곽 영기, "수치해를 이용한 컨테이너선의 점성 유동장 및 저항성능 해석", 서울대학교 박사학위 논문, 서울대학교, 1996
- 5) Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K., TEACH-2E Computation Code Manual, Dept. of Mechanical Eng., Imperial College, England, 1976
- 6) Ju, S. and Patel, V.C., "Stern Flows at Full-Scale Reynolds Number", J. Ship Research, Vol.35, No.2, 1991
- 7) 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
- 8) Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Mcgraw-Hill, 1980
- 9) 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