

## 제4장 모형선의 실선 확장

### 4.1 실질적인 축척 방법

모형선 시험 결과를 사용하여 선박의 동력을 예측할 때, 저항시험결과를 모형선으로부터 실선으로 축척(scale) 혹은 확장(extrapolate)해야 한다. 실선 확장 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 1870년대 Froude가 도입한 방법[4.1-4.3]이고 다른 하나는 1950년대 Hughes[4.4]의 방법인데 후자는 국제수조협회(ITTC)가 채택하였다.

#### 4.1.1 전통적 접근법: Froude

이 방법의 기초는 3.1.6절에 서술되었고 다음과 같이 요약된다:

$$C_T = C_F + C_R, \quad (4.1)$$

여기에서  $C_F$ 는 모형선 또는 실선과 길이가 같은 대체평판(equivalent plate)에 대한 마찰저항 계수이고,  $C_R$ 은 모형시험으로부터 유도되는 잉여저항계수이다:

$$C_R = C_{Tm} - C_{Fm}.$$

Froude 수가 같을 때 다음과 같은 Froude 법칙에 의하여,

$$C_{Rs} = C_{Rm}.$$

그리고

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rs} = C_{Fs} + C_{Rm} = C_{Fs} + [C_{Tm} - C_{Fm}].$$

즉,

$$C_{Ts} = C_{Tm} - [C_{Fm} - C_{Fs}]. \quad (4.2)$$

이 전통적 접근법을 Figure 4.1에 도시하였는데, 동일한 Froude 수에 대응하는 모형선과 실선의  $Re$ 에서  $C_{Rs} = C_{Rm}$ 이다.  $(C_{Fm} - C_{Fs})$ 는 모형선 총저항계수  $C_{Tm}$ 에 대한 마찰저항 보정이다. 모형선은 올바르게 않은  $Re$ 에서 작동하므로 (즉, Figure 4.1과 같이 모형선의  $Re$ 가 실선의  $Re$ 보다 훨씬 작으므로) 모형선에서의 마찰저항계수는 실선의 마찰저항계수보다 크다. 어떤 선박설계자들은 아직도 이 방법을 사용하지만, 이 방법은 대형선박에 대해서는 소요동력을 과대 예측하는 경향이 있다.

Froude 방법에선 Figure 4.1이 시사 하듯이  $C_F$  값이  $Re$ 의 함수로서 명시적으로 정의된 것이 아님을 주의해야 한다. 이 사항은 4.3절에 더욱 자세히 논의한다.

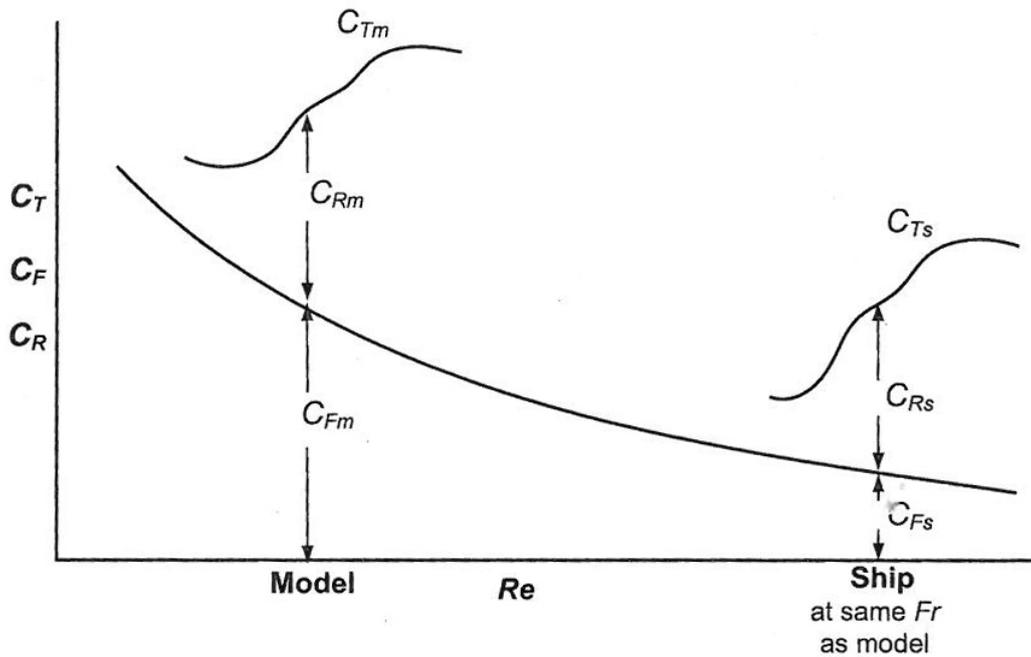


Figure 4.1. Model-ship extrapolation: Froude traditional.

**4.1.2 형상계수 접근법: Hughes**

Hughes는 실선 확장 과정에서 형상계수(form factor)를 고려할 것을 제안하였다. 이 방법의 기초는 다음과 같이 요약된다:

$$C_T = (1+k)C_F + C_W, \tag{4.3}$$

혹은

$$C_T = C_V + C_W, \tag{4.4}$$

여기에서

$$C_V = (1+k)C_F.$$

그리고  $(1+k)$ 는 선체형상에 좌우되는 형상계수이고,  $C_F$ 는 평판실험결과에 기초한 마찰저항계수,  $C_V$ 는 마찰저항과 점성압력저항을 모두 고려한 점성저항계수,  $C_W$ 는 조파저항계수이다. 이 방법은 Figure 4.2에 개략적으로 도시되어 있다.

Froude 법칙에 근거하여

$$C_{Ws} = C_{Wm}.$$

이고

$$C_{Ts} = C_{Tm} - (1+k)(C_{Fm} - C_{Fs}). \tag{4.5}$$

이는 ITTC에서 권장하고 대부분의 선박설계자가 채택하는 방법이다. 어떤 고속선 및 요트의 경우는 형상계수 방법이 사용되지 않을 수 있다.

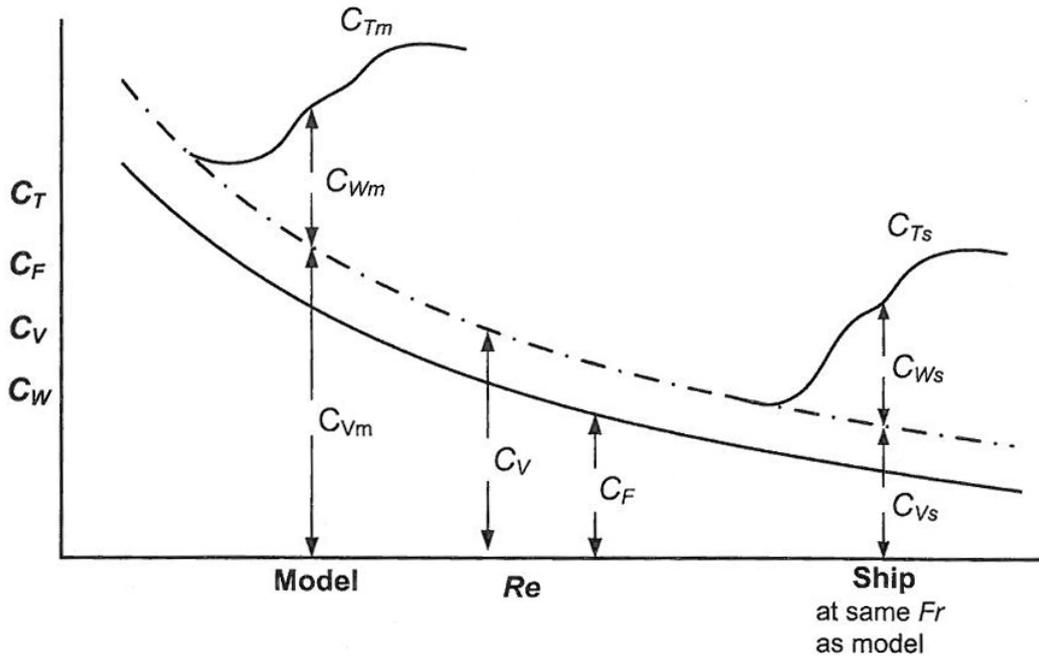


Figure 4.2. Model-ship extrapolation: form factor approach.

형상계수  $(1+k)$  는 선체형상에 따라 좌우되는데  $Fr$  가 작아져서 조파저항계수  $C_W$  가 0에 가까워져  $(1+k) = C_{Tm}/C_{Fm}$  이 되는 저속 시험에서 구할 수 있다. 이 방법 및 형상계수를 구하는 다른 방법을 4.4절에서 설명한다.

두 가지 축척 방법의 근본적인 차이를 강조하는 것이 의미있다. Froude는  $C_F$  보다 큰 모든 저항(잉여저항  $C_R$ )이 동일한 Froude 수에서 배수량에 비례한다는 Froude 법칙에 의하여 축척된다고 가정했다. 이는  $C_R$  에 포함된 점성압력(형상)저항이 Reynolds 축척을 따른다는 점에서 옳지 않다. Hughes는 총 점성저항(마찰과 형상)이 Reynolds 축척을 따른다고 가정했다. 이것 역시 점성저항이 Froude 수에 의존하는 조파저항과 상호작용하므로 전적으로 옳은 것만은 아니다. Hughes의 형상저항 방법은 그러나, Froude의 방법보다는 실제 물리적인 저항 성분 구분에 훨씬 근접해 있기 때문에 일반적으로 채택되고 있다.

Froude 방법 및 형상계수 방법 모두 선택된  $C_F$  곡선의 크기 및 기울기에 크게 영향받는다는 점을 주목하는 것이 중요하다. 4.3절에는 선택 가능한  $C_F$  곡선에 대하여 논의한다.

### 4.2 상사선 계열(Geosim Series)

총 저항만이 측정되는 실험결과로부터 식 (3.32)  $C_T = f_1(Re) + f_2(Fr)$  의  $f_1$  및  $f_2$  를 알아내기 위하여 몇몇 실험자들이 동일한 형상의 크기가 다른 모형선들에 대하여 저항시험을 수행한 적이 있다. Telfer[4.5-4.7]는 그러한 모형선 계열에 대하여 '상사선 계열(Geosim Series)' 혹은 '상사선(Geosim)' 이라는 용어를 만들어 냈다. 계열선 시험 결과를 Reynolds 수에 대하여 플롯하면 대략 Figure 4.3과 같은 형상이 된다.

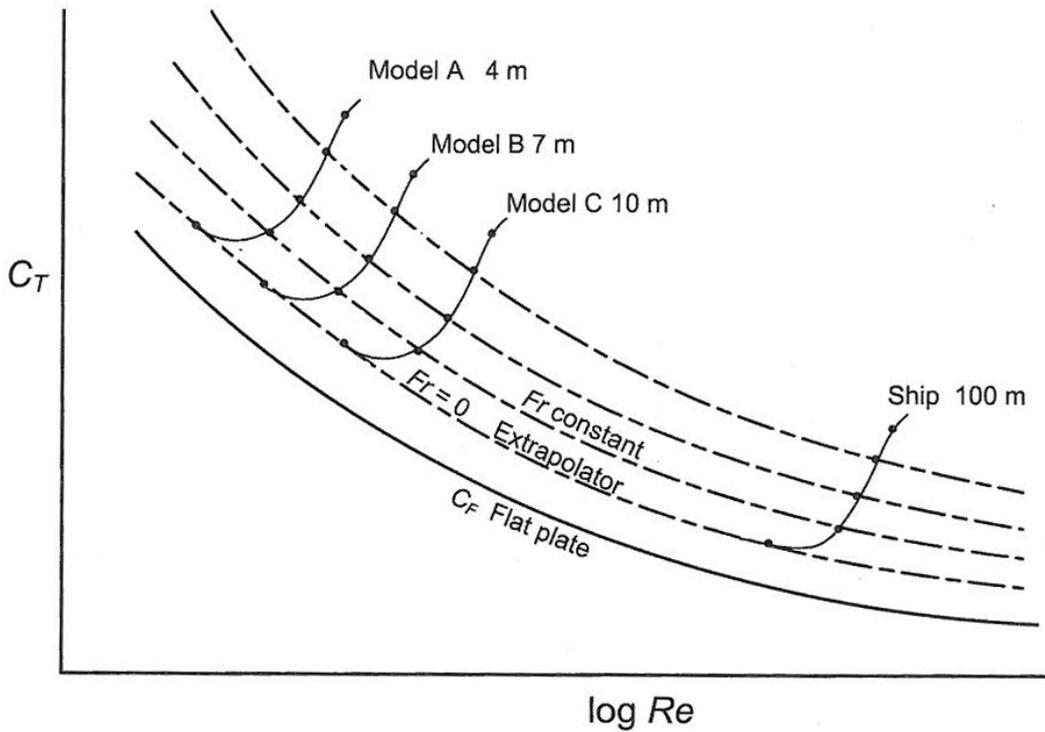


Figure 4.3. Schematic layout of Geosim test results.

측정된 일련의  $C_T$ 는 Reynolds 수가 커지면서 대응되는 Froude 수에서의 값들이 점점 작아지는데, 개개의 저항 곡선들은 동일한 침수표면적을 지닌 평판에 대한 저항 곡선보다 대략 같은 정도만큼 위에 위치해 있다. 다시 말하면, 선박 저항은 마찰과 잉여 저항으로 분리하지 않아도 모형선으로부터 직접 예측될 수 있다는 것이다. 실험 데이터 중에서 Froude 수가 같은 점을 지나는 곡선은 마찰저항 곡선과 평행해야 한다. 확장곡선(extrapolator)은 Figure 4.3에 도시된 것처럼 모형선 결과로부터 실험적으로 결정될 수 있다. 그러나 상사선 시험은 모형선 시험 결과의 타당성을 입증하는 등의 연구 목적으로는 가치 있지만, 일상적인 상업적 시험용으로는 비용 대비 효율이 떨어지는 경향이 있다. 실선인 *Simon Bolivar* 와 *Lucy Ashton* 의 모형선 계열에 대한 실험결과를 Figure 4.4 및 4.5에 보이고 있다[4.8, 4.9, 4.10].

### 4.3 평판 마찰저항 공식

4.1절에서 논의한 것처럼 마찰저항 곡선의 크기 및 기울기는 모형선 저항 시험 데이터를 실선 저항으로 확장하는 데 기본이 된다. 다음의 절들은 선박 저항에서 사용되는 주요한 마찰저항 곡선의 개요를 서술한다.

#### 4.3.1 Froude 실험결과

Froude는 1860년대 얇은 널빤지의 물 속에서의 마찰저항을 결정하기 위한 최초의 체계적인 실험을 수행한다. 그는 여러 가지 다른 방식으로 코팅된[4.1, 4.2] 폭 19in, 두께 3/16in, 길이는 2~50ft의 널빤지들을 사용하였다. Barnaby[4.11]에 따르면, 총 저항을 측정하기 위하여 기계식 동력계를 사용하였고, 속도는 0에서 800ft/min(4m/s) 범위에서 변화되었다.

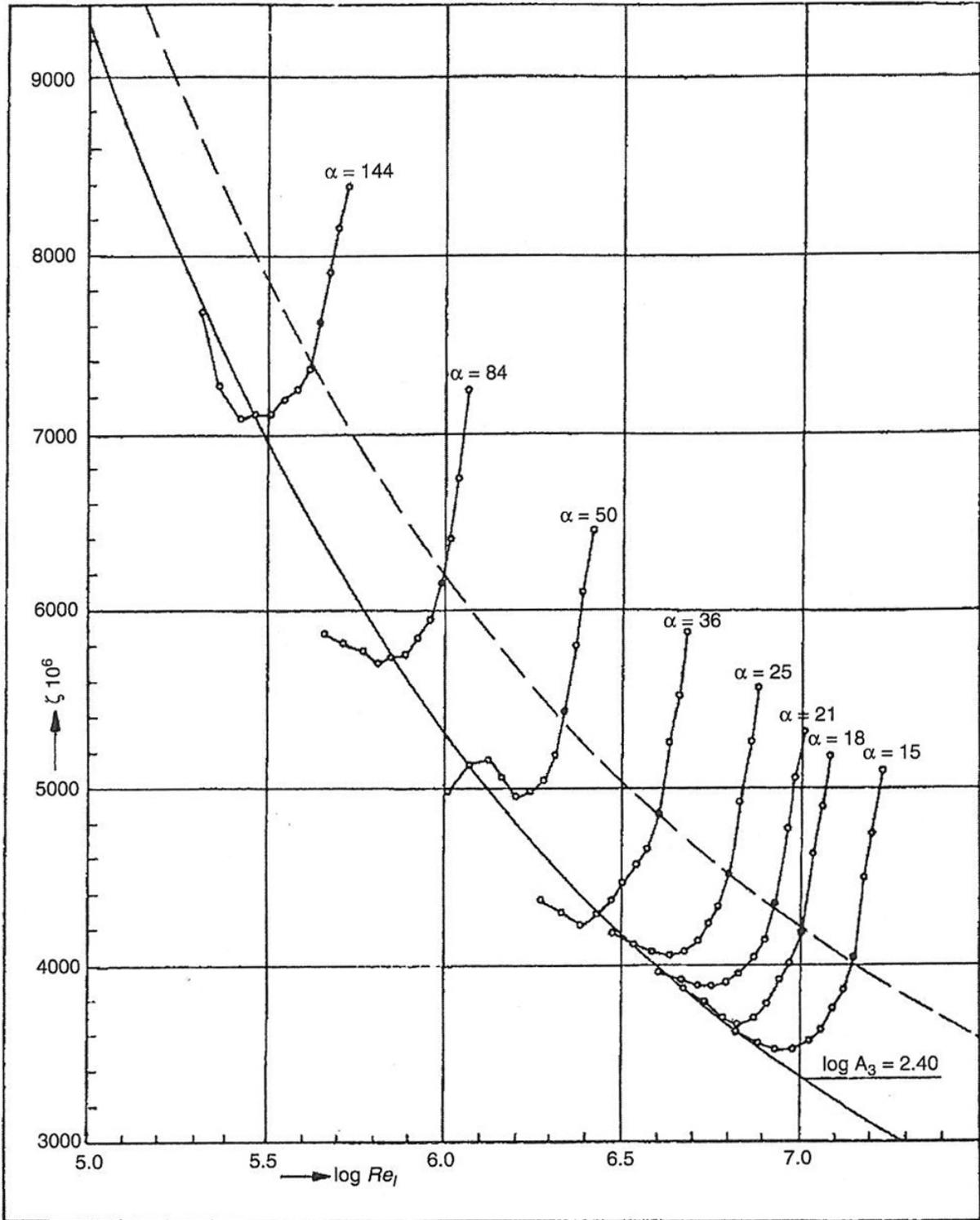


Figure 4.4. The *Simon Bolivar* model family,  $\alpha = \text{scale}$  [4.8].

Froude는 널빤지의 마찰저항 실험 결과를 다음과 같은 경험식으로 나타낼 수 있음을 발견하였다.

$$R = f \cdot S \cdot V^n \quad (4.6)$$

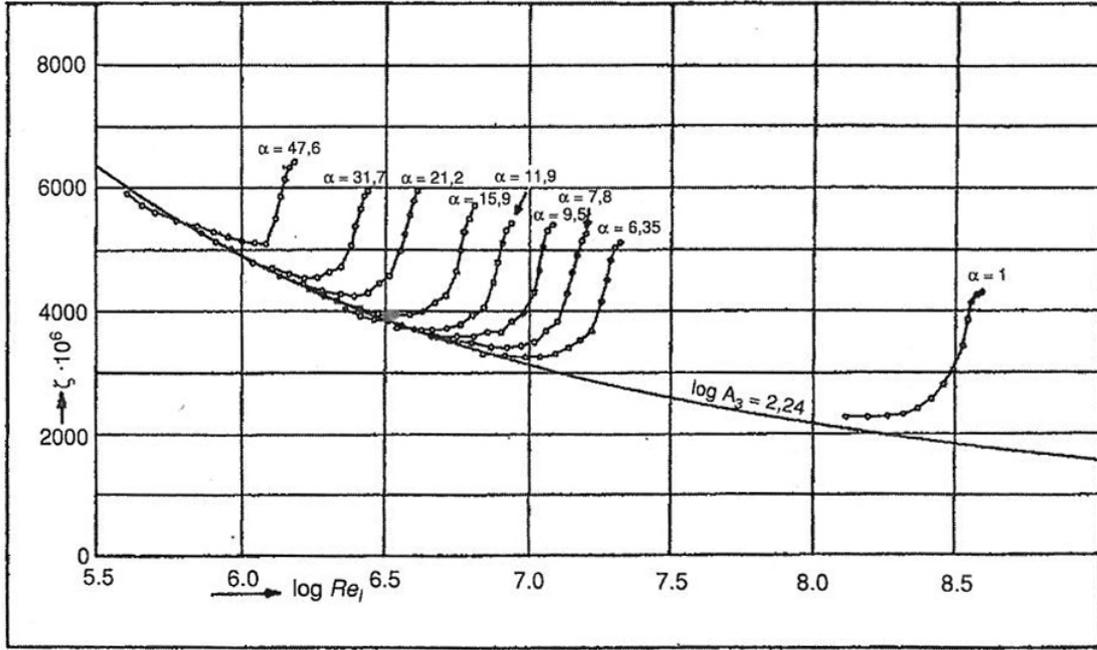


Figure 4.5. The Lucy Ashton model family,  $\alpha = \text{scale}$  [4.8].

계수  $f$  및 지수  $n$ 은 표면의 형태 및 길이에 따라서 변하는 것으로 나타났다. 원래의 발견은 다음과 같이 요약된다:

1. 계수  $f$ 는 길이가 아주 짧을 때를 제외하고, 널빤지 길이가 늘어나면 줄어든다.
2. 지수  $n$ 은 거친 표면을 제외하면 2보다 훨씬 작은데, 거친 표면에 대해서는 2에 근접한다 (매우 짧거나 매우 매끄러운 표면에서는 2보다 크다).
3. 거칠기 정도는  $f$ 의 크기에 뚜렷한 영향이 있다.

Froude는 길이가 50ft까지(길이가 50ft 보다 크면 길이 49-50ft에서  $f$  값 사용을 권장)인 널빤지에서 표면이 니스(vernish), 파라핀 왁스, 고운 모래 및 거친 모래표면일 때  $f$  및  $n$ 의 값을 요약하였다.

R. E. Froude(W. Froude의 아들)는 부친의 실험결과를 다른 실험결과와 함께 재조사하여 깨끗한 선체 표면 혹은 파라핀 왁스 모형선에 해당하는 널빤지의 마찰저항은 다음과 같이 표현할 수 있다고 생각했다.

$$R_F = f \cdot S \cdot V^{1.825} \tag{4.7}$$

관련된  $f$  값은 Table 4.1을 참고하라.

만약 Froude의 데이터를  $Re$ 의 함수로써 정리하면, 결과는 다음과 같이 나타난다:

$$R = f \cdot S \cdot V^{1.825} .$$

$$C_F = R / (0.5\rho S V^2) = 2 \cdot f \cdot V^{-0.175} / \rho = 2 \cdot f \cdot \nu^{-0.175} \cdot Re^{-0.175} / (\rho L^{-0.175}),$$

그러면

$$C_F = f' \cdot Re^{-0.175} ,$$

여기에서  $f'$  는 길이의 함수이다. 데이터에 따르면, Figure 4.6[4.12]에 주어진 것처럼 길이에 따라 늘어난다.

차원 관점에서 무차원계수인  $C_F$  는 무차원변수  $Re$  만의 함수여야 하기 때문에 위와 같은 결론은 용인할 수 없다. Froude는 차원해석 및 Reynolds[4.13]의 연구를 모르고 있었음을 명심해야 한다.

Table 4.1. R.E. Froude's skin friction  $f$  values

Length (m)	$f$	Length (m)	$f$	Length (m)	$f$
2.0	1.966	11	1.589	40	1.464
2.5	1.913	12	1.577	45	1.459
3.0	1.867	13	1.566	50	1.454
3.5	1.826	14	1.556	60	1.447
4.0	1.791	15	1.547	70	1.441
4.5	1.761	16	1.539	80	1.437
5.0	1.736	17	1.532	90	1.432
5.5	1.715	18	1.526	100	1.428
6.0	1.696	19	1.520	120	1.421
6.5	1.681	20	1.515	140	1.415
7.0	1.667	22	1.506	160	1.410
7.5	1.654	24	1.499	180	1.404
8.0	1.643	26	1.492	200	1.399
8.5	1.632	28	1.487	250	1.389
9.0	1.622	30	1.482	300	1.380
9.5	1.613	35	1.472	350	1.373
10.0	1.604				

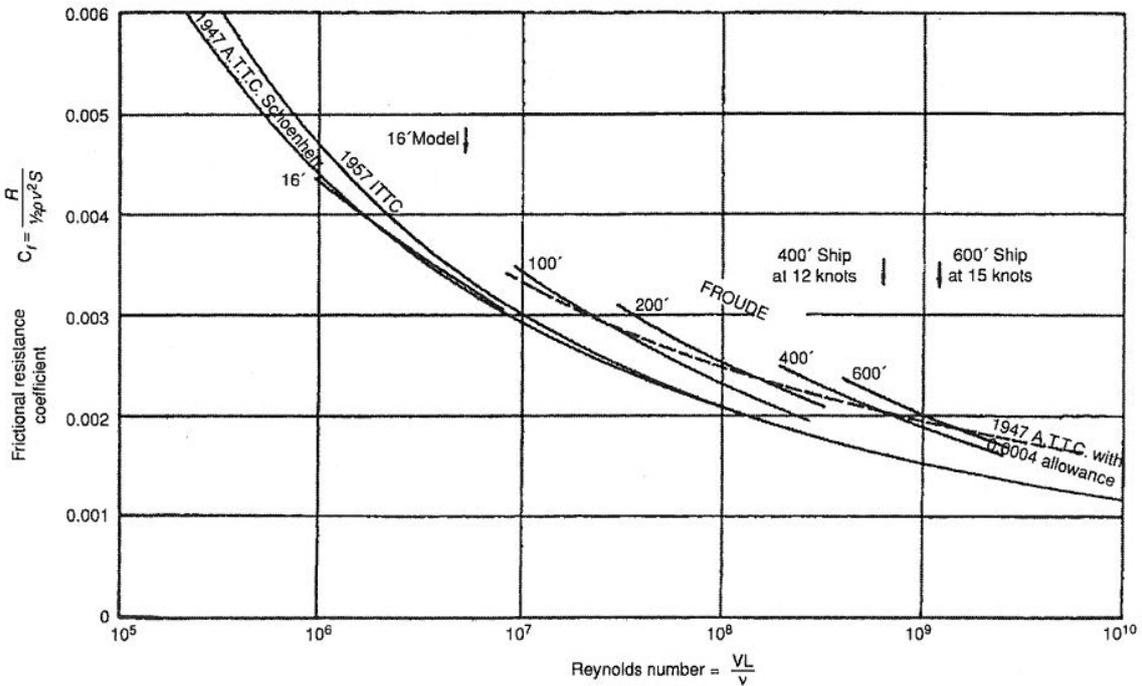


Figure 4.6. Comparison of different friction formulae.

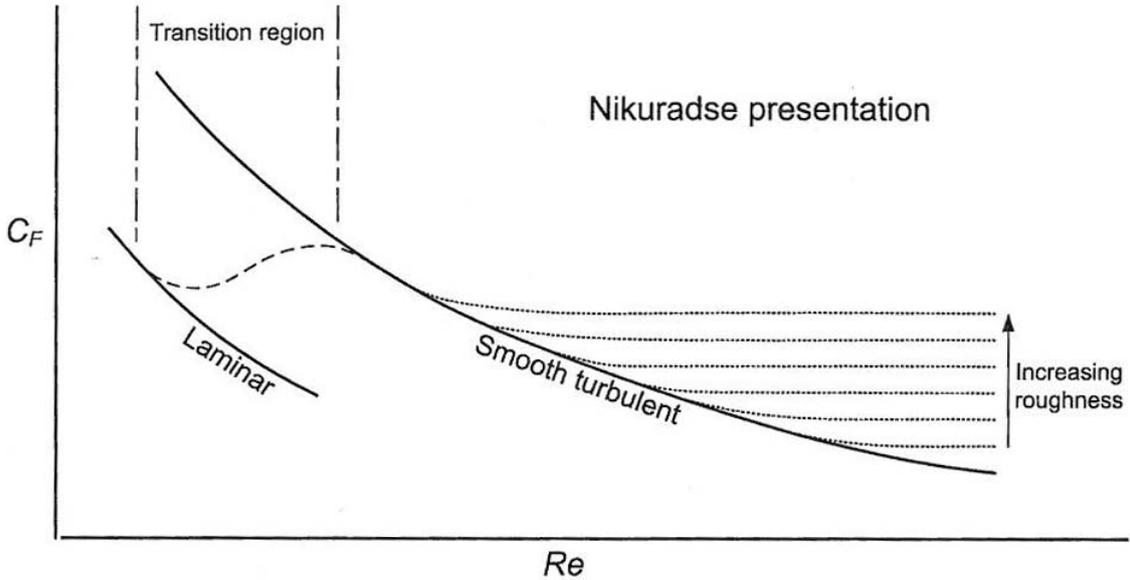


Figure 4.7. Effects of laminar flow and roughness on  $C_F$ .

당시에는 몰랐지만, Froude 데이터는 세 가지의 경계층 특성을 드러내고 있다. Nikuradse의 기념비적인 연구결과(Figure 4.7의 개념도 참조)를 참조하여 Froude 결과를  $Re$  에 따라 조사해보면, 다음의 특성들이 명백해진다.

- (i) 길이가 20ft 보다 작을 때에는 층류 혹은 천이유동의 영향을 받는다; Froude는 이례적 현상으로 기록했다.
- (ii)  $Re$  가 클 때, 거친 널빤지에 대한  $C_F$  는  $Re$  에 무관하게 일정한 값이 된다. Figure 4.7처럼 일정한 값이 되는  $Re$  는 거칠기에 따라 좌우된다;  $C_F$  가 일정하다는 것은 Froude가 관찰했듯이  $R \propto V^2$  임을 시사한다.
- (iii) 널빤지의 날카로운 모서리에서는 경계층이 얇기 때문에  $C_F$  가 크다. 때문에 Froude가 사용한 폭이 일정한 널빤지에서는 길이가 길어질수록 모서리 효과가 더욱 두드러진다; 즉,  $f'$  은 길이가 늘어나면서 커진다.

Figure 4.6에서 볼 수 있는 것처럼 Froude의  $f$  값, 즉  $C_F$  는 배의 길이가 길어지면서( $Re$  가 커지면서) 매끈한 난류 저항곡선보다 훨씬 위에 놓여 있다. 배 길이 대략 500ft(152m) 까지는 Froude 데이터가 만족스럽고 아직도 사용되고 있지만 Froude 방법은 소요동력을 과대예측(최대 15%)하므로 명백히 오류가 있다. Table 4.1에는 Froude의  $f$  값을 열거했는데, 여기에서  $L$  은 수선의 길이(m)이고, 식 (4.7)의 단위는 다음과 같다:  $V$  는 속도(m/s),  $S$  는 침수표면적( $m^2$ ) 그리고  $R_F$  는 마찰저항(N)이다.

$f$  값의 표에 대한 합리적인 근사식(오차 1.5% 이내)은 다음과 같다

$$f = 1.38 + 9.4 / [8.8 + (L \times 3.28)] \quad (L \text{의 단위는 m}). \tag{4.8}$$

R. E. Froude는 마찰저항 보정을 위한 'O'값의 사용과 더불어 원문자의 무차원수 표기법도 고안했는데[4.14], 3.1절 및 10.3절을 참조하라.

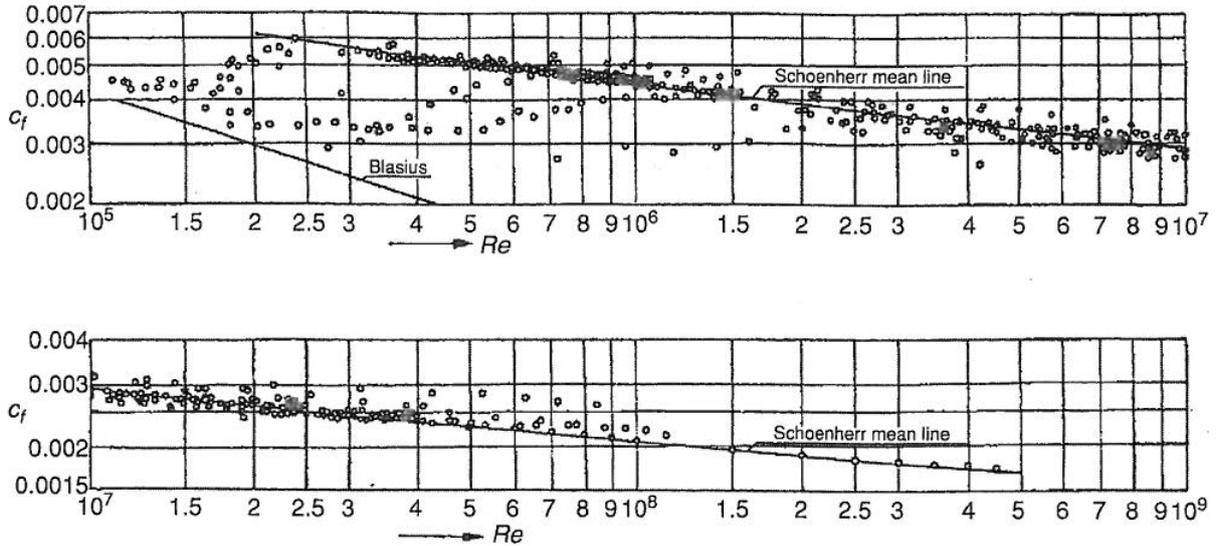


Figure 4.8. The Schoenherr mean line for  $C_F$ .

### 4.3.2 Schoenherr 공식

1920년대 초반 von Karman은 난류경계층에 대한 2차원 해석에 기초한 평판 마찰저항 법칙을 추론하였다. 그는 다음과 같은 형태의 이론적인 '매끄러운 난류' 저항 법칙을 고안하였다.

$$1/\sqrt{C_F} = A + B \log(Re \cdot C_F), \tag{4.9}$$

여기에서  $A$ 와  $B$ 는 두 개의 미정된 상수이다. 이 공식에 따라 Schoenherr는 공기와 물에서 수행된 가능한 모든 널빤지 실험 결과를 다시 플롯하여 이에 잘 들어맞는  $A$ 와  $B$ 의 값을 찾아내고자 하였다[4.15]. 그는 다음 공식을 결정하였다:

$$1/\sqrt{C_F} = 4.13 \log_{10}(Re \cdot C_F) \tag{4.10}$$

이 공식을 사용하면 실험결과가 얻어진  $Re$  범위를 뛰어넘는 영역에서도 Froude 방법보다 더 나은 실선 확장결과를 얻는데 이는 이 공식이 이론적인 근거를 지니고 있기 때문이다. Schoenherr 곡선의 기반이 되는 실험 데이터는 Figure 4.8[4.16]에서 찾아볼 수 있다. 데이터는 적당한 정도로 흩어져 있으며 분명히 천이 및 모서리 효과를 포함하고 있기 때문에 여기에 나타난 평균선(mean line)의 정확도는 그런 맥락에서 평가해야 한다. Schoenherr 곡선은 1947년 미국 수조협회(ATTC)에 의하여 채택되었다. 모형선의 실선 확장을 위해 사용할 때에는 표면거칠기 보정계수  $\Delta C_F = 0.0004$ 를 실선 마찰저항계수에 더하는 것이 일반적인 관행인데, Figure 4.6을 참조하라.

$C_F$ 가 주어진  $Re$ 에 대하여 양함수 형태로 정의되지 않기 때문에 Schoenherr 공식은 사용하기에 그다지 편리하지 않다. 주어진  $Re$ 에 대하여  $C_F$ 를 계산하려면,  $C_F$ 의 범위를 가정하고 그에 해당하는  $Re$ 를 계산한 후 보간법을 실시해야 한다. 반복해법이긴 하지만, 컴퓨터나 스프레드시트로 간단히 수행할 수 있다. 초기 소요동력 추정을 위해서는 다음과 같은 Schoenherr 곡선에 대한 합리적인 근사식(오차 1% 이내)을 사용할 수 있다[4.17]

$$C_F = \frac{1}{(3.5 \log_{10} Re - 5.96)^2} \quad (4.11)$$

Table 4.2. Variation in  $C_F$  with  $Re$

$Re$	$C_F$	$\log_{10} Re$	$\log_{10} C_F$
$10^5$	$8.3 \times 10^{-3}$	5	-2.06
$10^9$	$1.53 \times 10^{-3}$	9	-2.83

### 4.3.3 ITTC 공식

Schoenherr 공식을 근사할 수 있는 양함수 형태의 공식이 여러 가지 제안되었다. 식 (4.10)의 Schoenherr 공식은 다음과 같이 전개된다:

$$1/\sqrt{C_F} = 4.13 \log_{10}(Re \cdot C_F) = 4.13 (\log_{10} Re + \log_{10} C_F) \quad (4.12)$$

Table 4.2에서 볼 수 있는 것처럼  $C_F$ 와  $\log C_F$ 는  $Re$ 에 대하여 비교적 천천히 변화한다. 즉, 다음 형태와 같은 공식

$$1/\sqrt{C_F} = A(\log_{10} Re - B)$$

은  $B$ 를 2로 놓는다면 그다지 비합리적인 것은 아니다. 이를 다음과 같이 바꿔쓸 수 있다:

$$C_F = \frac{A'}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.13)$$

본질적으로 Schoenherr 공식의 근사식인 이 식의 변형된 형태가 여럿 있다.

1957년 ITTC는 소요동력 계산에서의 '상관곡선'으로 사용하기 위하여 그와 같은 공식을 하나 채택하였다. 이는 ITTC1957 모형선-실선 상관곡선으로 명명되었다. 이 공식은 2차원 곡선을 위한 다음과 같은 Hughes[4.4]의 제안에 기반을 두고 있다.

$$C_F = \frac{0.066}{(\log_{10} Re - 2.03)^2}. \quad (4.14)$$

ITTC1957 공식은 3차원 효과를 약간 포함하여 다음과 같이 정의되었다:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}. \quad (4.15)$$

이는 결과적으로는 식 (4.14)의 Hughes 공식에 12%의 형상 효과가 가미된 것이다.

Figure 4.6을 보면 ITTC 상관곡선과 Schoenherr 곡선을 비교해 볼 수 있는데, 실선의  $Re$  값에서는 서로 일치하지만,  $Re$  가 작을 때에는 ITTC 상관곡선이 Schoenherr 곡선 위에 있음을 알 수 있다. Schoenherr 곡선을 사용할 때의 경험 상 작은 모형선을 사용할 경우 큰 모형을 사용하는 경우보다 소요동력을 과대예측하기 때문에 ITTC 공식은 이를 감안하여 의도적으로 보정된 것이다.

이와 같은 다양한 공식들이 평판의 저항을 나타낸다는 구실은 존재하지 않으며 (거칠기와 모서리 효과가 존재함을 명심하라), 대부분의 선형에 있어 웬만한 정도의 근사치를 주기는 하여도 실제 선형의 마찰(접선방향 전단응력)저항을 나타낸다고 주장해서는 안 된다는 점을 강조한다. 이러한 곡선들은 단지 모형선과 실선 사이, 크기가 다른 선박 사이의 축척 보정치를 판단하기 위한 *상관곡선* 으로서만 사용될 뿐이다.

ITTC1978 동력예측 절차(5장 참조)는 식 (4.15)를 형상계수와 더불어 사용할 것을 권장한다. 형상계수  $(1+k)$  의 유도방법은 4.4 절에서 논의한다.

### 4.3.4 저항곡선에 대한 다른 제안들

#### 4.3.4.1 Grigson 공식

Schoenherr 및 ITTC 공식에 대한 가장 진지한 대안은 Grigson[4.18]의 제안으로서, 그는 낮고 높은  $Re$  에서 식 (4.15)의 ITTC 공식을 약간 수정할 것을 주장하였다. Grigson의 제안공식은 다음과 같다:

$$C_F = [0.93 + 0.1377(\log Re - 6.3)^2 - 0.06334(\log Re - 6.3)^4] \times \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}, \quad (4.16)$$

$Re$  범위는  $1.5 \times 10^6 < Re < 2 \times 10^7$  이다.  
 $10^8 < Re < 4 \times 10^9$  에서는 다음과 같다.

$$C_F = [1.032 + 0.02816(\log Re - 8) - 0.006273(\log Re - 8)^2] \times \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}. \quad (4.17)$$

일반적으로 Grigson 방법은 현존하는 다른 방법들보다 물리적으로 보다 정확한 것으로 공감대가 형성되는 것 같다. 그러나, 다른 방법과의 차이점 내지 개선점이 작아서 시험수조 공동체에서는 모형선의 실선 확장 용도로는 사용하지 않는 경향이 있는데, 관련 사항은 ITTC[4.19, 4.20]을 참조하라. Grigson은 자신의 방법에 대한 추가 개선을 [4.21]에 제안하였다.

#### 4.3.4.2 CFD 방법

저항 곡선을 모사하기 위하여 수치적 방법이 사용되어 왔다. 그러한 접근법의 예를 Date 와 Turnock[4.22]이 제시하고 있는데, 그들은 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식(RANS) 해석법을 사용하여 속도 범위에 대한 평판의 마찰 저항 값을 유도하고 저항 상관관계 곡선을 개발하고자 하였다. 산출된 곡선은 Schoenherr 곡선에 매우 근접하였다. 이 연구는 CFD가 마찰 저항을 합리적으로 잘 예측할 수 있음을 입증함과 동시에, 총 점성 저항 및 형상계수를 예측할 수 있는 잠재력이 있음도 나타내고 있다. 이는 9장에서 논의한다.

### 4.4 형상계수의 유도

식 (4.5)로부터 형상계수의 크기는 모형선의 실선 확장 과정 및 실선 저항 예측값에 직접적인 영향을 미치는 것이 명백하다. 형상계수의 변화는 점성저항 대 조파저항 성분 비율이 변화에서 기인한다. 예를 들어, 모형선 저항을 실선으로 확장할 때 모형선에서 유도한 (혹은 가정한) 형상계수  $(1+k)$  값이 증가하면 조파저항계수  $C_W$ 가 감소하고 실선 저항값의 추정치도 감소한다. 형상계수를 추정하는 방법은 실험적, 수치적 그리고 경험적 방법이 있다.

#### 4.4.1 모형 시험

형상계수를 직간접으로 유도할 수 있는 모형시험 바법은 여러 가지가 있는데, 다음과 같이 요약된다.

1. Figure 4.9처럼,  $C_T$  곡선이  $C_F$ 와 평행하게 될 때까지 모형을 매우 낮은  $Fr$ 에서 시험하여  $C_W$ 가 0에 접근하면  $(1+k) = C_T/C_F$ 로 구한다.
2.  $C_W$ 를 낮은 속도에서 외삽한다. 이 절차는 다음을 가정한다.

$$R_W \propto V^6 \quad \text{혹은} \quad C_W \propto R_W/V^2 \propto V^4$$

즉

$$C_W \propto Fr^4 \quad \text{혹은} \quad C_W = A Fr^4,$$

여기에서  $A$ 는 상수이다. 따라서, 비교적 낮은 속도에서 측정된  $C_T$ 값으로부터  $C_T = (1+k)C_F + A Fr^4$ 를 사용하면  $(1+k)$ 를 찾을 수 있다.  $Fr = 0.1 \sim 0.2$  정도로 낮은 속도가 이 방법에 적합한데 그렇게 낮은 속도에서는 저항을 정확히 계측하는 것이 일반적으로 어렵다는 문제점이 존재한다.

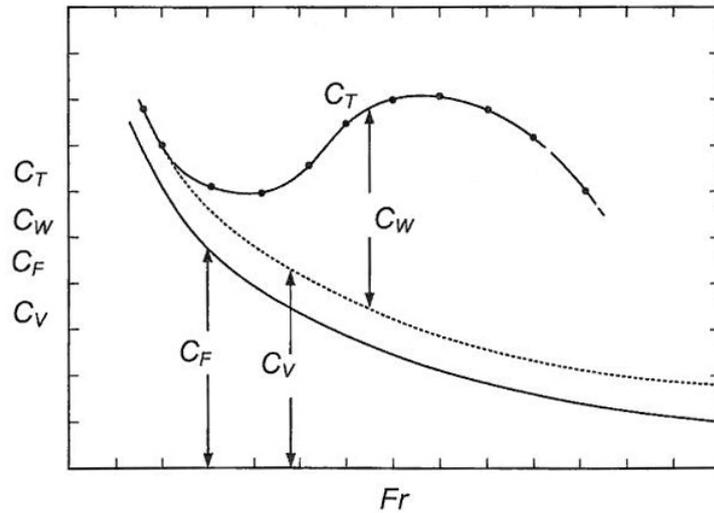


Figure 4.9. Resistance components.

기술된 방법은 Hughes의 것이다. Prohaska[4.23]은 유사하지만 더 많은 데이터를 다음 수식에 적용하는 방법을 사용한다.

$$C_T/C_F = (1+k) + A Fr^4/C_F \tag{4.18}$$

여기에서 그래프의 y 절편이  $(1+k)$ , 기울기가  $A$ 가 된다(Figure 4.10 참조).

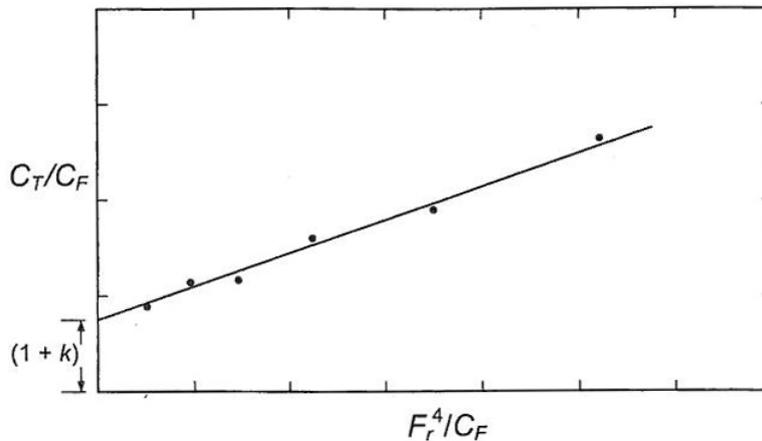


Figure 4.10. Prohaska plot.

비대한 선형의 경우 그래프가 직선이 되지 않을 수 있는데  $Fr$ 의 지수를 4와 6 사이로 하는 것이 더 적당할 수 있다.

이후의 ITTC의 권장사항은 Prohaska 방법을 약간 수정한 것으로

$$C_T/C_F = (1+k) + A Fr^n/C_F \tag{4.19}$$

여기에서  $n$ ,  $A$  및  $k$ 를 최소자승법으로 구한다.

3.  $(1+k)$  를 저항성분을 직접 물리적으로 계측하여 구한다:

$$C_T = (1+k)C_F + C_W = C_V + C_W,$$

(a) 총 점성저항  $C_V$  을 직접측정(예를 들어 반류 측정, 7장 참조)

$$C_V = (1+k)C_F, \text{ 그리고 } (1+k) = C_V/C_F$$

(b) 조파저항  $C_W$  을 직접측정(예를 들어 파고계 사용, 7장 참조)

$$(1+k)C_F = C_T - C_W, \text{ 그리고 } (1+k) = (C_T - C_W)/C_F$$

파형계측에 의한 조파저항 측정이 일상적 수조 시험에서도 실질적인 선택사항이기는 하지만, 3(a) 및 3(b) 방법은 일반적으로 일상적 시험보다는 연구목적으로 사용된다. 3(a) 및 3(b) 방법으로부터는  $(1+k)$  를 전체 속도 범위에서 구할 수 있고 속도에 따른  $(1+k)$  의 변화를 나타내고 있음을 주목해야 한다.

#### 4.4.2 CFD 방법

점성 저항과 형상계수를 유도하는 데 CFD를 활용할 수 있다. RANS 해석법을 이용한 마찰 곡선의 유도를 4.3.4.2절에서 설명하였다. Molland 와 Utama[4.24]는 RANS 해석법과 풍동 실험 결과로부터 단동선 및 쌍동선 배치에서 타원체의 형상계수를 추정하였다. CFD를 이용한 마찰 저항 및 점성 저항 유도는 9장에서 추가로 논의한다.

#### 4.4.3 경험적 방법

몇몇 연구자들에 의하여 모형시험 결과에 기반을 둔  $(1+k)$  에 대한 경험식이 개발되었다. 다음은 실제 소요동력 예측에서 사용될 수 있는 몇 개의 예를 보이고 있다.

Watanabe:

$$k = -0.095 + 25.6 \frac{C_B}{\left[\frac{L}{B}\right]^2 \sqrt{\frac{B}{T}}}. \quad (4.20)$$

Conn과 Furguson[4.9]:

$$k = 18.7 \left[ C_B \frac{B}{L} \right]^2. \quad (4.21)$$

Grigson[4.21], 약간 수정된 ITTC 곡선 기반:

$$k = 0.028 + 3.30 \left[ \frac{S}{L^2} \sqrt{C_B \frac{B}{L}} \right]. \quad (4.22)$$

Holtrop의 회귀분석[4.25]:

$$(1+k) = 0.93 + 0.487118(1 + 0.011 C_{stern}) \times (B/L)^{1.06806} (T/L)^{0.46106} \\ \times (L_{WL}/L_R)^{0.121563} (L_{WL}^3/\nabla)^{0.36486} \times (1 - C_P)^{-0.604247}. \quad (4.23)$$

만일  $L_R$  이 알려지지 않았으면 다음 공식으로 추정할 수 있다.

$$L_R = L_{WL} \left[ 1 - C_P + \frac{0.06 C_P LCB}{4C_P - 1} \right]. \quad (4.24)$$

여기서  $LCB$  는  $0.5L_{WL}$  전방의  $L_{WL}$  의 백분율이다. 선미 형상 변수  $C_{stern}$  은 선형 변화에 대하여 Table 4.3과 같이 주어진다.

Table 4.3.  $C_{stern}$  parameter

Afterbody form	$C_{stern}$
Pram with gondola	-25
V-shaped sections	-10
Normal section shape	0
U-shaped sections with Hogner stern	10

Wright[4.26]:

$$(1+k) = 2.480 C_B^{0.1526} (B/T)^{0.0533} (B/L_{BP})^{0.3856}. \quad (4.25)$$

Couser 등[4.27], 둥근 빌지를 갖는 단동선 및 쌍동선에 대하여:

$$\text{단동선: } (1+k) = 2.76(L/\nabla^{1/3})^{-0.4}. \quad (4.26)$$

$$\text{쌍동선: } (1+\beta k) = 3.03(L/\nabla^{1/3})^{-0.4}. \quad (4.27)$$

실질적인 목적에서, 형상계수는 선속 범위 내에서 일정하고, 모형선과 실선에서 동일한 값을 갖는 것으로 가정된다.

#### 4.4.4 천수의 영향

Millward[4.28]은 형상계수에 대한 천수효과를 조사하였다. 천수에서의 수조시험 결과로부터, 그

는 수심이 감소하면서 형상계수는 증가하고 다음 공식으로 형상계수 증가량을 근사할 수 있다고 추론하였다.

$$\Delta k = 0.644 (T/h)^{1.72} , \quad (4.28)$$

여기에서  $T$ 는 선박의 흘수(m)이고  $h$ 는 수심(m)이다.

#### 참고문헌 (제4장)

- 4.1 Froude, W. Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water, *42nd Report of the British Association for the Advancement of Science*, Brighton, 1872.
- 4.2 Froude, W. Report to the Lords Commissioners of the Admiralty on experiments for the determination of the frictional resistance of water on a surface, under various conditions, performed at Chelston Cross, under the Authority of their Lordships, *44th Report of the British Association for the Advancement of Science*, Belfast, 1874.
- 4.3 Froude, W. *The papers of William Froude*. The Royal Institution of Naval Architects, 1955.
- 4.4 Hughes, G. Friction and form resistance in turbulent flow and a proposed formulation for use in model and ship correlation. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol 96, 1954, pp 314-376.
- 4.5 Telfer, E.V. Ship resistance similarity. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 69, 1927, pp. 174-190.
- 4.6 Telfer, E.V. Frictional resistance and ship resistance similarity, *Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilder*, 1928/29.
- 4.7 Telfer, E.V. Further ship resistance similarity. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 93, 1951, pp. 205-234.
- 4.8 Lap, A.J.W. Frictional drag of smooth and rough ship forms. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 98, 1956, ppp. 137-172.
- 4.9 Conn, J.F.C. and Ferguson, A.M. Results obtained with a series of geometrically similar models. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 110, 1968, pp. 255-300.
- 4.10 Conn, J.F.C., Lackenby, H. and Walker, W.P. BSRA Resistance experiments on the Lucy Ashton. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 95, 1953, pp. 350-436.
- 4.11 Barnaby, K.C. *Basic Naval Architecture*. Hutchinson, London, 1963
- 4.12 Clements, R.E. An analysis of ship-model correlation using the 1957 ITTC line. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 101, 1959, pp. 373-402.
- 4.13 Reynolds, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 174, 1883, pp. 935-982.
- 4.14 Froude, R.E. On the 'constant' system of notation of results of experiments on models used at the Admiralty Experiment Works, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 29, 1888, pp. 304-318.
- 4.15 Schoenherr, K.E. Resistance of flat surfaces moving through a fluid, *Transactions of*

- the Royal Institution of Naval Architects and marine Engineers*, Vol. 40, 1932.
- 4.16 Lap, A.J.W. Fundamentals of ship resistance and propulsion. Part A Resistance. Publication No. 129a of the Netherlands Ship Model Basin, Wageningen. Reprinted in *International ShipBuilding Progress*.
- 4.17 Zborowski, A. Approximate method for estimation resistance and power of twin--screw merhacnt ships. *International Shipbuilding Progress*, Vol. 20, No.221, January 1973, pp. 3-11.
- 4.18 Grigson, C.W.B. An accurate smooth friction line for use in performance prediction, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 135, 1993, pp.149-162.
- 4.19 ITTC. Report of Resistance Committee, p. 64, *23rd International Towing Tank Conference*, Venice, 2002
- 4.20 ITTC. Report of Resistance Committee, p. 38, *25th International Towing Tank Conference*, Fukuaka, 2008.
- 4.21 Grigson, C.W.B. A plannar friction algorithm and its use in analysing hull resistance. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 142, 2000, pp. 76-115.
- 4.22 Date, J.C. and Turnock, S.R. computational fluid dynamics estimation of skin friction experienced by a plane moving through water. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 142, 2000, pp. 116-135.
- 4.23 ITTC Recommended Procedure, Resistance Test 7.5-02-02-01, 2008.
- 4.24 Molland, A.F. and Utama, I.K.A.P. Experimental and numerical investigations into the drag characteristics of a pair of ellipsoids in close proximity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 216, Part M. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2002.
- 4.25 Holtrop, J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, Vol. 31, November 1984, pp. 272-276
- 4.26 Wright, B.D.W. Apparent viscous levels of resistance of a seties of model geosims. BSRA Report WG/H99, 1984.
- 4.27 Couser, P.R., Molland, A.F., Armstrong, N.A. and Utama, I.K.A.P. Calm water powering perdition for high speed catamatans, *Proceedings of 4th International Conference of Fast Sea Transportation, FAST'97*, Sydney, 1997.
- 4.28 Millward, A. The effects of water depth on hull form factor. *International Shipbuilding Progress*, Vol. 36, No. 407, October 1989.

(공 란)