

3.2 기타 저항 성분(other drag components)

3.2.1 부가물 저항(appendage drag)

3.2.1.1 배경

선박의 대표적인 부가물로는 타(rudder), 안정핀(stabiliser), 보싱(bossing), 축 브래킷(shaft bracket), 빌지킬(bilge keel), 물 흡입구(water inlet scoop) 등이 있으며, 이것들은 선박의 저항을 증가시킨다. 단축선(single-screw ship)의 주된 부가물은 타와 빌지킬인데 전체 부가물 저항의 약 2~5%를 차지한다. 쌍축선(twin-screw vessels)의 경우, 주된 부가물로는 2개의 타와 축, 축 브래킷 그리고 보싱과 빌지킬 등이 있다. 이것들은 선박의 크기에 따라 전 저항의 8~25%를 차지한다. 부가물의 전형적인 저항 값을 정수 중에서의 저항에 대한 백분율로 Table 3.2에 나타내었다.

Table 3.2. Resistance of appendage, as a percentage of hull naked resistance

Item	% of naked resistance
Bilge keels	2-3
Rudder	up to about 5 (e.g. about 2 for a cargo vessel) but may be included in hull resistance tests
Stabiliser fins	3
Shafting and brackets, or bossings	6-7
Condenser scoops	1

Table 3.3. Total resistance of appendages as a percentage of hull naked resistance

Vessel type	% of naked resistance
Single screw	2-5
Large fast twin screw	8-14
Small fast twin screw	up to 25

3.2.1.2. 부가물 저항에 미치는 요소들

국부 유선의 방향과 잘 정렬된 경우 부가물의 저항은 부가물의 침수표면적에

2 선체저항특론

비례하는 표면 마찰저항이다. 국부 유선 방향과 잘 정렬되지 않거나 설계가 잘못된 몽둥한 형상의 부가물인 경우 유기저항이 발생할 수 있고 또한 박리현상으로 인해 저항이 크게 증가할 수 있다. 수면 가까이 있는 부가물은 조파저항도 발생한다. 부가물의 올바른 부착을 위해서는 국부 유선의 방향을 아는 것이 중요하다. 국부 유선을 알기 위해서는 페인트 시험(Paint streaks test), 터프트(tufts) 시험, 플래그(flags) 시험, PIV(Particle Image Velocimetry) 등 다양한 시험기법이 사용된다. 또한 전산유체역학(CFD)도 효과적으로 사용되고 있다. 부가물의 설계와 부착은 하나의 속도 즉 설계속도에 맞춘 것으로서 다른 속도에서는 국부 흐름이 변하고 또한 트림도 변할 수 있어 부가물에 의한 저항 증가는 피할 수 없는 현상이다.



Fig. 빌지킬 부착을 위한 유선 시험 결과(붉은 선이 빌지킬의 부착 마크임)

유체의 흐름방향과 일치시키는 문제 외에 부가물의 저항에 영향을 미치는 다른 특징은 부가물의 부착으로 인해 경계층의 두께와 부가물의 후미 국부 유속이 변한다는 것이다. 예로서 선체 중앙부 빌지에서 약 10%의 경계층 두께의 증가를 초래하고 선수 근처에서는 10%의 감소와 선미에서는 더 큰 감소를 야기할 수 있다.

모형시험에 의한 부가물의 저항을 실선으로 확장하는 것은(scaling) 레이놀즈 수 변화에 따른 국부 유동현상의 차이로 인해 현실적인 어려움이 있다. 이러한

어려움은 층류와 난류 유동, 박리 현상 및 부가물 부착지점에서의 선체 외부 방향으로의 속도 기울기 등에 의해 나타난다.

3.2.1.3. 표면 마찰 저항

모형시험에서 부가물은 실물 크기보다 아주 작은 Reynolds 수에서 적용된다. 결과적으로 실물 크기의 부가물은 난류흐름(turbulent flow)에서 작동할 가능성이 있는 반면, 모형 부가물은 층류흐름(laminar flow)에서 작동한다. 표면 마찰 저항(skin friction resistance)은 난류보다 층류흐름에서 작아짐으로(Figure 3.18), 실선으로 확장할 경우 문제가 발생한다.

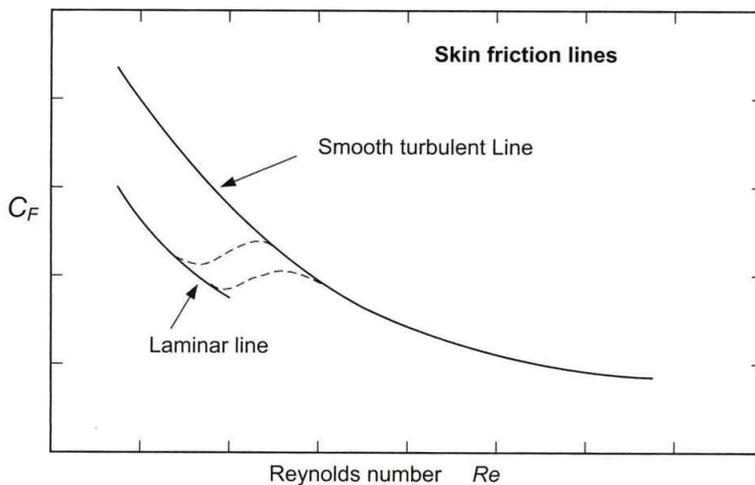


Figure 3.18. Skin friction lines.

3.2.1.4 박리저항(separation resistance)

박리가 발생한 물체의 저항은 난류에서보다 층류일 때가 더 크다(Figure 3.20). 이로 인해 실선으로의 확장에 문제가 발생한다.

4 선체저항특론

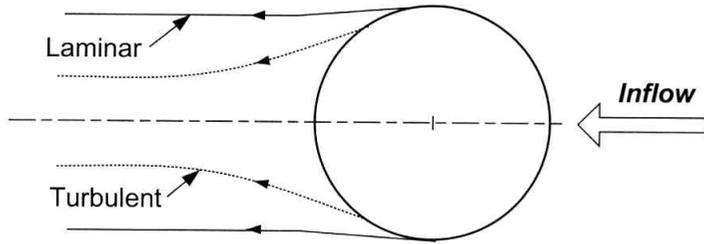


Figure 3.20. Separated flow

3.2.1.5 속도 기울기 영향(velocity gradient effects)

실선에서 경계층(full-scale boundary layers)은 모형에서의 경계층 두께의 약 절반이다. 따라서 속도 기울기 효과는 실제 선박(full-scale ship)보다는 모형에서 더 크다. 이러한 현상은 모형에서의 부가물은 경계층 내부에 있으나 실선에서의 부가물은 경계층 외부로 돌출 될 수 있다(Figure 3.21). 경계층 내부와 외부에서의 유동은 아주 다르며 실선의 경우 경계층 외부에 돌출된 부가물표면에서는 층류가 될 수 있다. 따라서 부가물 주위 유동이 박리의 존재유무에 따라 저항이 증가되거나 감소될 수 있다. 경계층 두께(boundary layer thickness)에서 이러한 차이는 15knots로 운항하는 100m 길이의 선박에 대응하는 축적비 1/20인 5m 길이의 모형시험에 대해서 다음의 근사계산(approximate calculations)에 의해 설명될 수 있다.

Figure 3.19에서 1/7승 법칙 속도분포(power law velocity distribution)를 이용하여 난류흐름에 대한 평판(flat plate)상 경계층 두께 δ 의 근사가 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\delta}{x} = 0.370 Re^{-1/5} \quad (3.37)$$

여기서 x 는 앞 가장자리(leading edge)로부터의 거리이다.

100m인 선박에 대해서

$$Re = VL/\nu = 15 \times 0.5144 \times 100 / 1.19 \times 10^{-6} = 6.48 \times 10^8$$

선박의 선미끝단(aft end)에서 경계층 두께(boundary layer thickness)는

$$\delta = x \times 0.370 Re^{-1/5} = 100 \times 0.370 \times (6.48 \times 10^8)^{-1/5} = 640mm$$

5m 모형의 대응속도(corresponding speed)와 레이놀즈 수는

$$V_M = 15 \times 0.5144 \times 1 / \sqrt{20} = 1.73 \text{ m/s}$$

$$Re = VL/\nu = 1.73 \times 5 / 1.14 \times 10^{-6} = 7.59 \times 10^6$$

모형에 대한 경계층 두께는

$$\delta = 5 \times 0.370 (7.59 \times 10^6)^{-1/5} = 78 \text{ mm}$$

기하학적 축적비가 1/20인 모형선의 경우 실선의 축적에 의해 예상되는 경계층의 두께는 32mm이다. 따라서 모형선의 실제 경계층 두께인 78mm는 예상치 두께 32mm에 비해 두 배보다 더 두껍다(Figure 3.21 참조).

식 (3.37)은 평판에 대해 유효한 식이지만 첫 번째 근사(first approximation)로서 선체형상(ship shapes)에 대해서도 적용된다.

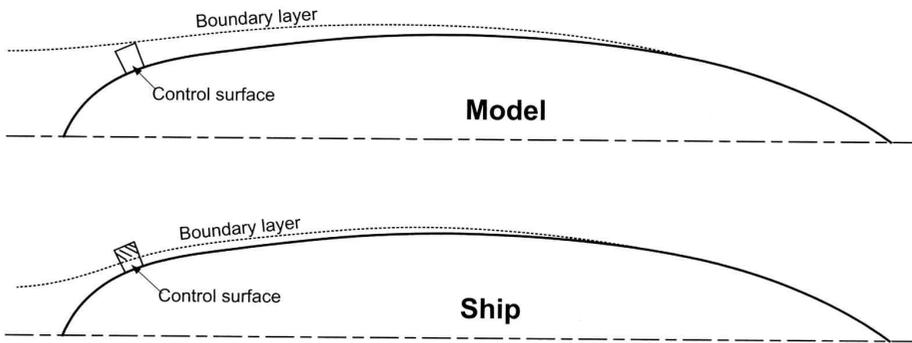


Figure 3.21. Model and full-scale boundary layers.

3.2.1.6 부가물 저항 추정

주요한 방법은 다음과 같다

(i) 나선 모형과 부가물을 부착한 모형으로 저하시험을 한다. 부가물 부착 유무에 따른 C_T 의 차이는 바로 부가물의 저항을 나타내고 이를 바로 실선으로 확장한다.

(ii) Form factor approach. 이것은 (i)과 유사하지만 형상계수(form factor)가 사용된다. $C_{DS} = (1+k)C_{DM}$ 여기서 형상계수 $(1+k)$ 는 여러개의 축적비를 가지는 모형시험(geoism tests)으로 구한다. 이 방법은 여러개의 모형제작으로 인

6 선체저항특론

한 비용과 시간이 많이 소요된다.

(iii) 분리된 부가물에 대해서 고속에서 시험한다. 수조(towing tank)나 풍동(wind tunnel)에서 큰 부가물 혹은 빠른 속도에서 시험을 하면 실선의 레이놀수에 근접할 수 있다. 선박의 타와 제어 부가물(control surfaces) [3.34], 요트의 킬 같은 부가물 시험에 사용된다.

(iv) 이전 모형으로부터 얻어진 실험 데이터와 축적된 데이터를 바탕으로 유도된 경험식을 사용한다.

3.2.1.7 부가물 저항의 Scaling

부가물들이 부착된 모형선의 저항을 측정할 때, 부가물은 그 자체의 Re 에서 작동되고 따라서 실선으로 확장할 때는 이론적으로 다른 scaling 법칙을 따른다. 이러한 현상과 더불어 앞에서 언급한 유동형태(층류와 난류), 박리 및 속도 기울기 현상들이 실선으로의 확장에 오차를 야기하는 요인이다. 국제예인수조회의(ITTC)는 부가물에 대하여 다음의 축적비 계수(scale effect factor) β 을 사용하도록 제안하였다.

$$C_{Dship} = \beta C_{Dmodel} \quad (3.38)$$

계수 β 는 부가물 형태에 따라 0.5~1.0의 값을 가진다.

부가물 스케일에 관한 시험 데이터는 많지 않다. 1940년대에 NPL의 수조에서 Allan은 여러가지 스케일의 모형들을 시험하였다[3.35]. 1950년대는 British Ship Research Association(BSRA)에서 여러 부가물이 부착된 58m 선박 Lucy Ashton으로 제트 추진기를 사용하여 시험하였다. 선체 내부에 탑재된 제트 엔진은 하중 변환기(Load Transducer)를 통해 추력을 직접 계측하면서 저항도 측정하였다. 시험 결과는 NPL에서 시험된 6개의 geosim 모형시험 결과와 비교되었다(Lackenby [3.36]). 이러한 시험결과로부터 β 계수는 선체 길이가 증가하면 그 값이 증가함을 알았고 궁극적으로 모형의 크기가 실선의 크기와 같으면 β 는 1이 된다. Lucy Ashton 시험으로부터 얻어진 A-bracket과 open shaft에 대한 β 값의 요약은 Table 3.4에 나타내었다. 이 시험결과들은 비교적 일관성이 있지만 시험 결과의 일부가 이전의 다른 시험 결과와 일치되지 않는 것도 있다. Lucy Ashton과 당시 다른 시험으로부터 얻은 결과가 정확한 결론을 주는

것은 아니다.

요약하면 일반적인 수조 실험은 부가물이 부착되지 않은 나선으로 저항시험을 수행하고 부가물이 부착된 실선의 저항 추정에는 근사적인 스케일링 법을 적용한다. ITTC β 계수를 사용하는 일반적인 실험관행은 빌지킬과 타는 $\beta=1$ 을 사용하고, 축과 브래킷은 $\beta=0.5$ 를 사용한다. 예를 들어, 유선을 따라 설치된 유선형의 부가물은 마찰저항만을 가진다. 이러한 사실은 실선의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 부가물의 유동이 층류일 가능성이 있으므로 실선의 경우 보다 작은 마찰저항을 받는다, 이러한 경우는 $\beta=0.5$ 를 사용한다.

Table 3.4 β values for A-brackets and open shafts from the Lucy Ashton tests

Ship speed (knots)	Model					
	2.74 m	3.66 m	4.88 m	6.10 m	7.32 m	9.15 m
8	0.48	0.52	0.56	0.58	0.61	0.67
12	0.43	0.47	0.52	0.54	0.57	0.61
14.5	0.33	0.37	0.41	–	0.46	0.51

3.2.1.8 부가물 저항 데이터

국부 유속(Local Flow Speed)

부가물 저항의 상세한 해석을 수행할 때, 국부적인 유속과 경계층 특성이 요구된다. 부가물 주위 유속의 근사치는 선속의 $\pm 10\%$ 그리고 앞에서 언급한 경계층 두께가 적용될 수 있다. 프로펠러 부근의 부가물에 대하여 반류속도(wake speed)는 $V_a = V_s(1 - w_T)$ 으로 된다(Chapter 8 참조). 프로펠러의 하류에 위치한 타의 경우 V_a 는 프로펠러로 인해 $10\% - 20\%$ 가속되고, 따라서 1차 근사치로서 V_s 의 사용은 적절할 수 있다.

(a) 데이터

Hoerner [3.37]는 다음과 같은 다양한 부가물에 저항 데이터를 제공하고 있다.

8 선체저항특론

- 소나돔(sonar domes) 같은 bluff bodies.
- Root interference drag를 포함하는 strut와 bossing.
- 일렬로 설치된 여러 물체의 shielding effect.
- inlet heads, plate overlaps, gaps in flush plating과 같은 유동
- Scoops, inlets.
- Spray, ventilation, cavitation, normal and bluff body and hydrofoils.
- Separation control using vortex generator guide vanes.
- Rudders and control surfaces.

Mandel [3.38]은 부가물 설계에 대한 다양한 유체역학적 측면을 기술하였다.

Hoerer, Mandel 및 다른 문헌에 소개된 다양한 부가물에 대한 저항을 추정하기 위한 간단한 식들을 소개한다.

(b) 빌지킬(bilge keels)

Peck(1976)은 빌지킬의 저항은 다음의 두 가지 성분으로 구분하였다.

- 침수표면적의 증가로 인한 표면마찰(skin friction)
- 선체와 빌지킬의 접합부에서의 간섭저항(interference drag)

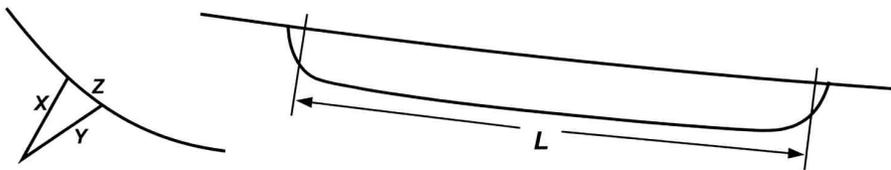


Figure 3.22. Geometry of bilge keel.

ITTC는 전저항은 $(S + S_{BK})/S$ 을 곱한 것으로 권장한다. 여기서 S 는 선체 침수면적이고, S_{BK} 는 빌지킬의 침수면적이다. Peck [3.39]에 의한 빌지킬 저항은 다음과 같다(Figure 3.22).

$$D_B = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_F \left[2 - \frac{2Z}{X+Y} \right] \quad (3.39)$$

여기서 S 는 빌지킬의 침수표면적, L 은 C_F 을 계산할 때 사용되는 빌지킬의 평균길이이다. Figure 3.22에서 Z 의 치수가 클 때 간섭저항은 zero이고, Z 가 zero일 때(판 빌지킬), 간섭저항은 표면마찰 저항과 같다고 가정한다.

(c) 타, 축 브래킷, 안정핀

이들 저항의 원인은 다음과 같다.

- Control surfaces or strut drag, D_{CS}
- 물보라저항(Spray drag) if rudder or strut penetrates water surface, D_{SP}
- Drag of palm, D_P
- Interference drag of appendage with hull, D_{INT}

전저항은 다음과 같다.

$$D_{AP} = D_{CS} + D_{SP} + D_P + D_{INT} \quad (3.40)$$

Peck [3.39]에 의해 제안된 제어판(control surface) 저항 D_{CS} 는 다음과 같다.

$$D_{CS} = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_F \left[1.25 \frac{C_m}{C_f} + \frac{S}{A} + 40 \left(\frac{t}{Ca} \right)^3 \right] \times 10^{-1} \quad (3.41)$$

여기서 C_m 은 C_F 의 계산을 위해 사용되는 평균 코드길이 즉 $(C_f + C_a)$, S 는 침수면적, A 는 최대 단면의 전면 투영면적, t 는 최대 두께, V 는 선속이다.

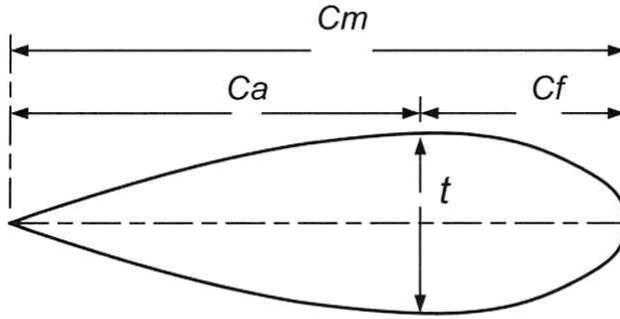


Figure 3.23. Geometry of strut or control surface.

Hoerner [3.37]에 따르면 2차원 날개 단면의 항력계수는 단면의 최대 두께가 되는 곳이 단면의 앞날로부터 현 길이의 30%되는 곳에 놓여지는 형상일 때 다음의 식을 사용한다.

$$C_D = C_F \left[1 + 2 \left(\frac{t}{c} \right) + 60 \left(\frac{t}{c} \right)^4 \right] \quad (3.42)$$

여기서 c 는 C_F 의 계산을 위해 사용되는 현 길이이다.

레이놀즈 수가 1×10^7 보다 작을 때에는 이 식은 충분히 정확하지는 않는데 그것은 이 식에서 사용되는 표면 마찰계수는 난류 경계층에 대한 것이어서 Kirkman 등은 1980년에 날개형 부가물(foil type appendage)에 대하여 사용하도록 다음의 계산식들을 유도하였다.

$R_n \leq 5 \times 10^4$ 일 때

$$C_D = 1.46 (R_n)^{-0.507} \quad (t/c = 0 \text{ 일 때})$$

$$C_D = 0.466 (R_n)^{-0.259} \quad (t/c = 0.22 \text{ 일 때})$$

$5 \times 10^4 \leq R_n \leq 5 \times 10^5$ 일 때

$$C_D = 0.172 (R_n)^{-0.310} \quad (t/c = 0 \text{ 일 때})$$

$$C_D = 181 (R_n)^{-0.810} \quad (t/c = 0.2 \text{ 일 때})$$

t/c 의 중간 값에 대해서는 선형보간법(linear interpolation)을 적용하면 적정한 C_D 값을 구할 수 있다.

$5 \times 10^5 \leq R_n \leq 1 \times 10^7$ 일 때

$$C_D = 0.00293[1 + 2(t/c) + 60(t/c)^4]$$

$R_n \geq 1 \times 10^7$ 일 때

$$C_D = 0.03R_n^{-0.143}[1 + 2(t/c) + 60(t/c)^4]$$

이들 공식들은 낮은 레이놀즈 수 일 때의 제어판 저항을 추정하는데 쓰여질 수 있다.

이들 공식들을 써서 저항을 계산할 때 사용하게 되는 기준면적은 투영된 면적의 2배가 되어야 한다. 이 식들에서 사용되는 레이놀즈 수를 구할 때에는 현 길이의 평균값을 사용하여야 한다. 날개 단면의 간섭저항(foil parasitic drag)은 무시할 수 있다.

Hoerner [3.37]의 물보라저항(spray drag) D_{SP} 은

$$D_{SP} = 0.24 \frac{1}{2} \rho V^2 t_w^2 \quad (3.43)$$

여기서 t_w 는 수면에서 제어판의 최대 단면 두께이다.

프로펠러 스트러트가 선체와 매끄럽게 연결되지 않고 고착을 돕기 위한 연결 판(palm)이 끼워져 있을 때 이 연결 판으로 인하여 부가되는 저항 D_P 을 구하기 위해 Hoerner는 다음의 공식을 사용하였다.

$$D_P = 0.75 C_{DPalm} \left(\frac{h_p}{\delta} \right)^{1/3} W h_p \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.44)$$

여기서 h_p 는 선체표면으로부터 재어진 연결 판의 높이, W 는 전면에서 재어진 연결 판의 폭, δ 는 경계층의 두께 (근사적으로 $0.016 x_{bl}$, 이 때 x_{bl} 은 스트러트의 앞날로부터 판이 붙여진 곳까지의 거리), C_{DPalm} 은 연결 판이 둥근 모서리를 가진 사변형의 경우 0.65, V 는 선속이다.

Hoerner는 제어판 끝의 부가물이 선체를 스치는 유동과 간섭을 일으켜 나타나게 되는 저항성분 D_{INT} 에 대하여 다음 식과 같은 계산식을 제시하였다.

12 선체저항특론

$$D_{INT} = \frac{1}{2} \rho V^2 t^2 \left[0.75 \frac{c}{t} - \frac{0.0003}{(t/c)^2} \right] \quad (3.45)$$

여기서 t 는 선체와 이어지는 곳에서의 제어판의 최대 두께, c 는 선체와 이어지는 곳에서의 제어판의 코드 길이이다.

(d) 축계와 보싱

통상 프로펠러의 축들은 유동방향에 대하여 경사각을 가지고 있다. 이 경우 축과 스트러트 보싱 등에서 상당한 크기의 양력과 항력이 발생한다. 축 브래킷 스트러트의 세심한 정렬은 교차 흐름(cross flow)을 피하기 위해 필요하다.

저항 성분은

- (1) Drag of shaft, D_{SH}
- (2) Pressure drag of cylindrical portion, C_{DP}
- (3) Skin friction of cylindrical portion, C_F
- (4) Drag of forward and after ends of the cylinder, C_{DE}

Hoerner가 1965년에 발표한 바에 따르면 축의 직경을 사용하여 구한 Reynold's수가 $Re < 5 \times 10^5$ 일 때에는 다음 식이 사용된다.

$$D_{SH} = \frac{1}{2} \rho L_{SH} D_s V^2 (1.1 \sin^3 \alpha + \pi C_F) \quad (3.46)$$

여기서 L_{SH} = 축과 보싱의 전체 길이

D_s = 축과 보싱의 직경

α = 유동방향과 축의 방향이 이루는 각도 (Figure 3.24)

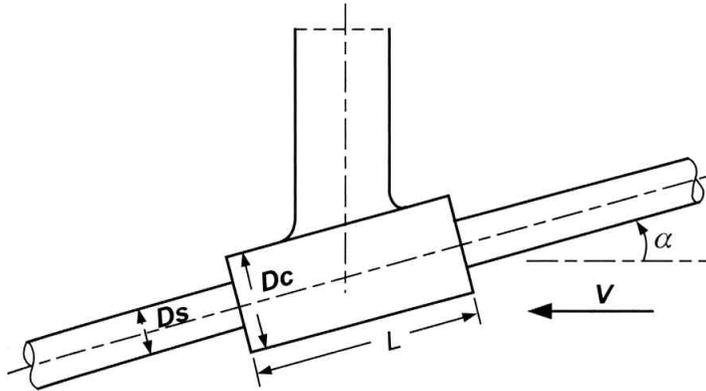


Figure 3.24. Shaft and bracket.

Kirkman 등은 1980년에 선체 부가물의 원통상 구간의 항력계수를 구하는 근사공식은 다음의 식들과 같다. 원통의 압력저항(pressure drag) C_{DP} 는 다음의 식들로 나타내어진다.

$$Re < 1 \times 10^5 \text{ 일 때 } C_{DP} = 1.1 \sin^3 \alpha$$

$$1 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5 \text{ 이고, } \alpha > \beta \text{ 일 때 } C_{DP} = -0.7154 \log_{10} Re + 4.677$$

$$1 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5 \text{ 이고, } \alpha < \beta \text{ 일 때}$$

$$C_{DP} = (-0.7154 \log_{10} Re + 4.677) [\sin^3 (1.783 \log_{10} Re - 7.9415) \alpha]$$

$$Re > 5 \times 10^5 \text{ 이고, } 0 < \alpha < 40^\circ \text{ 일 때 } C_{DP} = 0.60 \sin^3 (2.25 \alpha)$$

$$Re > 5 \times 10^5 \text{ 이고, } 40^\circ < \alpha < 90^\circ \text{ 일 때 } C_{DP} = 0.60$$

여기서 $Re = VD_c/\nu$, $\beta = -71.54 \log_{10} Re + 447.7$

$\alpha =$ 유동방향과 축의 방향이 이루는 각도

압력저항 계산에서 사용되는 기준면적은 축의 투영면적과 같으며 이는 축의 길이와 직경을 곱하여 얻어지는 ($L \times D_c$)의 면적과 같다.

교차흐름 속에 놓여진 축의 마찰저항 C_F 은 Kirkman 등에 의하면 다음 식과 같이 표시되어진다.

14 선체저항특론

$$\begin{aligned}
 Re < 5 \times 10^5, C_F &= 1.327 Re^{-0.5} \\
 Re > 5 \times 10^5, C_F &= \frac{1}{(3.461 \log_{10} Re - 5.6)^2} - \frac{1700}{Re}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

여기서 $Re = VLc/\nu$, $Lc = L/\tan\alpha$, $Lc > L$ 이고, L 은 축의 길이, 마찰저항 계산에 사용되는 기준면적은 축의 침수표면적으로 $\pi \times length \times diameter$ 과 같아진다.

위의 식들을 사용하여 얻어지는 저항에 주상체의 앞쪽과 뒤쪽 끝에서 나타나는 저항 C_{DE} 을 추가하여 주어야 한다.

$$\text{앞쪽 끝이 날카롭게 모가 졌을 때 } C_{DE} = 0.90 \cos^3 \alpha$$

$$\text{앞쪽 끝을 둥글게 만들었을 때 } C_{DE} = 0.01 \cos^3 \alpha$$

$$\text{뒤쪽 끝 } C_{DE} = \frac{0.029}{\sqrt{C_F S_{wet} / S_b}}$$

여기서 C_F 는 주상체의 특성길이를 기준으로 한 Reynold's수에서의 마찰저항 계수이고, S_{wet} 는 주상체의 침수표면적으로 $2\pi RL$ 과 같고, S_b 는 주상체의 단면적으로 πR^2 이 된다.

주상체의 단면저항(base drag)을 계산하는데는 단면적(πR^2)이 기준면적으로 사용되고 저항이 계산되어지고 있는 주상체의 바로 뒤쪽 후류 속에 직경이 작은 주상체가 놓여 있을 때에는 순단면적 [$\pi(R^2 - r^2)$]을 기준단면적으로 사용하게 된다.

Holtrop과 Mennen [3.43]은 다양한 부가물에 대한 다음의 경험식을 제시하였다.

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V_s^2 C_F (1 + k_2)_E \sum S_{APP} + R_{BT} \tag{3.48}$$

여기서 V_s 는 선속, C_F 는 선박에 대한 ITTC1957 곡선으로부터 결정되고, S_{APP} 는 부가물의 침수면적이다. $(1 + k_2)_E$ 은 다음 식으로 구해진다.

$$(1+k_2)_E = \frac{\sum(1+k_2)S_{APP}}{\sum S_{APP}} \quad (3.49)$$

부가물 저항계수 $(1+k_2)$ 는 Table 3.5에 나타내었다. 식 (3.48)에서 R_{BT} 는 선수 추진기(bow thruster)을 고려한 것이며, 다음과 같이 정의된다.

$$R_{BT} = \pi\rho V_S^2 d_T C_{BTO}, \quad (3.50)$$

여기서 d_t 는 추진기의 직경, 계수 C_{BTO} 는 0.003-0.0012 영역의 값이다. 추진기가 구상선수의 원통부분에 놓여 있을 때는 $C_{BTO} \rightarrow 0.003$ 이다.

Table 3.5. Appendage from factors $(1+k_2)$

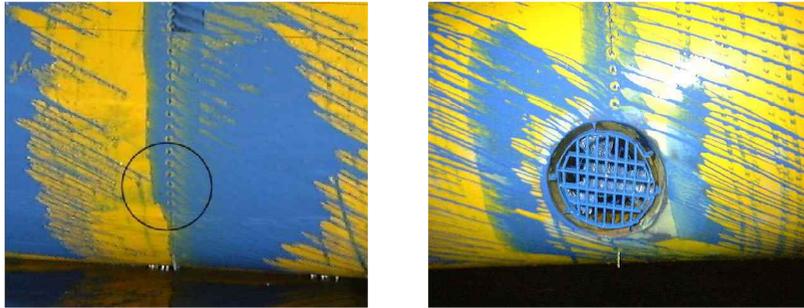
Appendage type	$(1+k_2)$
Rudder behind skeg	1.5-2.0
Rudder behind stern	1.3-1.5
Twin-screw balanced rudders	2.8
Shaft brackets	3.0
Skeg	1.5-2.0
Strut bossings	3.0
Hull bossings	2.0
Shafts	2.0-4.0
Stabiliser fins	2.8
Dome	2.7
Bilge keels	1.4

(e) 선수 추진기(bow thruster) 설계 및 모형시험

LNG, Cruiser, Ro-Ro, Ro-Pax 선 등과 선박은 충분한 조종성능 확보를 위해 선수 추진기와 같은 Side 추진기를 설치한다. Side 추진기의 경우 선체 내부로 터널을 만들어 추진기를 장착하여 측면으로의 추진력을 얻는 장치이다. 선체에 터널이 있는 경우 이 터널로 인해 유동이 방해되어 저항이 증가 될 수 있다. 이러한 저항 증가를 억제하기 위해 터널 외부에 그리드 부착한다. 추가적으로 터널에 의해 생성된 형상저항을 줄이기 위

16 선체저항특론

해 터널의 단(step)을 없애주기도 한다. 터널의 뒤 부분 단을 없애주는 것을 scallop이라고 하며 이러한 scallop설계를 위해서는 유선 시험이 필요하다(아래 그림 참조). 국부 유선에 적합하지 않은 scallop은 저항 감소 효과가 적을수도 있고 오히려 저항증가의 원인이 되기 때문이다.



(a) (b)
Fig 1. Paint test results of a Cruise vessel. (a)-bare hull, (b)- bow thruster(tunnel, grid and CPP)



Fig Paint test result of a LNGC with bow thruster(tunnel with scallop, grid and CPP)

50,000GT 크루저선의 모형시험 결과에 의하면 선수부에 터널이 있을 경우 나선의 저항보다 약 8.9%의 저항 증가가 있었고 grid가 설치된 경우 1.8%의 저항 증가가 있었다(Chun, 2009). 그리드는 터널 내부로 유입되는 유동을 억제하는 효과가 있고 이로 인해 박리와 와류생성을 억제하기 때문이다. 모형 시험 시 터널 내부에 프로펠러의 존재 유무는 이러한 유동을 제어하는 효과가 다르기 때문에 비용증가를 고려하더라도 모형시험의 정를 향상시키기 위해 가상(dummy) 프로펠러를 설치하는 것이 좋다. 터널내부에 프로펠러의 존재 여부에 따라 모형시험에서 항 차이가 약 1-2% 나는 것으로 나타났다.

(e) 요약

부가물의 유무에 따른 모형시험 결과가 없을 때에, 부가물 저항의 상세한 추정은 지금까지 언급한 수식과 데이터를 이용하여 해당하는 레이놀즈 수에서 계산한다. 또는 초기 동력 추정을 위해 Table 3.2와 3.3에 주어진 근사치를 사용할 수 있다. 몇가지 부가물 저항 추정의 예들은 부록에 주었다.

3.2.2 선체와 선루(superstructure)의 공기저항(air resistance)

3.2.2.1. 배경

바람이 없는 공기 중에서 운항하는 선박은 물위에 있는 선체와 선루에 공기 저항을 받는다. 공기저항은 선루의 크기와 형상 및 선속에 의존한다. 다양한 선박 유형에 대한 전형적인 공기저항이 정수중에서의 물의 저항에 대한 비율로 Table 3.6에 제시되었다.

물위에 있는 선체와 선루의 공기저항은 전 저항에 비해 상대적으로 작은 비율이다. 정지한 공기 중에서 선박이 운항할 때에 나타나는 공기저항은 바람이 있을 경우 특히 맞바람(head wind)인 경우 공기저항은 크게 증가할 수 있다. 따라서 많은 연료를 소비하는 대형 선박이나 고속선의 경우 공기저항을 감소시키기 위한 최적의 선루 형상 설계가 필요하다.

수선 위의 선루와 선체에 대한 공기저항은 뭉뚱한 물체(bluff body)에 관한 항력으로서 다루어진다. $Re > 10^3$ 일 때 뭉뚱한 물체에 대한 전형적인 C_D 값은 Table 3.7에 나타내었다.

Table 3.6. Examples of approximate air resistance

Type	L_{BP} (m)	C_B	D_w (tonnes)	Service speed (knots)	Service power (kW)	Fr	Air drag (%)
Tanker	330	0.84	250,000	15	24,000	0.136	2.0
Tanker	174	0.80	41,000	14.5	7300	0.181	3.0
Bulk carrier	290	0.83	170,000	15	15,800	0.145	2.5
Bulk carrier	180	0.80	45,000	14	7200	0.171	3.0
Container	334	0.64	100,000	26	62,000	0.234	4.5
Container	232	0.65	10,000 TEU 37,000 3500 TEU	23.5	29,000	0.253	4.0
Catamaran ferry	80	0.47	650 pass 150 cars	36	23,500	0.661	4.0
Passenger ship	265	0.66	2000 pass GRT90,000	22	32,000	0.222	6.0

Table 3.7. Approximate values of drag coefficient for bluff bodies, based on frontal area

Item	C_D
Square plates	1.1
Two-dimensional plate	1.9
Square box	0.9
Sphere	0.5
Ellipsoid, end on ($Re \times 10^5$)	0.16

바람이 있을 때 선박이 운항경우 선박과 풍속에 의한 상대속도는 Figure 3.2에서와 같이 정의된다.

공기저항은

$$R_A = \frac{1}{2} \rho_A C_D A_P V_A^2 \tag{3.51}$$

여기서 A_p 는 바람의 상대속도에 대한 선박의 수직 투영면적, V_A 는 상대 풍속이고, 공기의 밀도 $\rho_A = 1.23kg/m^3$ 이다(Table A1.1 참조).

선루 모델에 대한 풍동시험(wind tunnel test)의 결과는 일반적으로 A_T 를 사용하여 선수미 방향(x 축)의 항력(drag force)의 향으로 제시된다. A_T 는 선루의 전방 횡단면적이다.

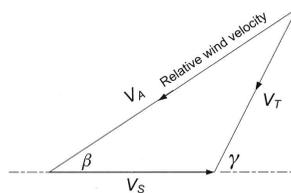


Figure 3.25. Vector diagram.

3.2.2.2 Shielding effects

하나의 선루 요소 뒤의 반류는 바람으로부터 다른 요소를 보호할 수 있거나 (Figure 3.26(a)), 선체 현호선(sheerline)에 의한 반류는 선루를 보호할 수 있다 (Figure 3.26(b)).

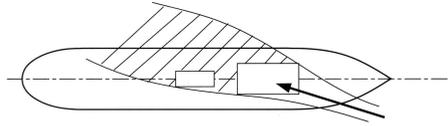


Figure 3.26. (a) Shielding effects of superstructure.

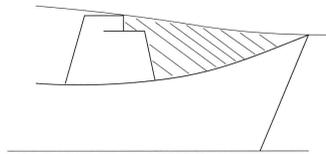


Figure 3.26. (b) Shielding effects of the sheerline.

3.2.2.3 공기저항의 추정

일반적으로 공기저항은 유사한 선박에 대한 모형시험 데이터로부터 추정하거나 모형을 직접 제작하여 풍동 시험을 수행하여 추정한다.

공기 중에서 박리저항은 Re 에 민감하지 않기 때문에 모형시험 결과로부터 실선의 저항추정은 케일링(scaling) 효과 없이 가능하다. 즉 $C_{Ds} = C_{Dm}$ 이다.

선체모델에 대한 전형적인 공기저항 도표(diagram)는 Figure 3.27에 제시되었다. 다른 갑판모양(deckhouse)에 대한 실제 풍동시험 데이터는 Figure 3.28에 나타내었다. 이 경우, C_X 는 (A_T/L^2) 의 함수이다.

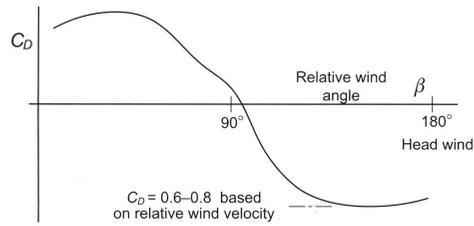


Figure 3.27. Typical air drag data from model tests.

바람에 의한 저항 데이터는 일반적으로 수선 위 선체에 선루를 더한 전방 면적(frontal area), 즉 횡단면적 A_T 을 기준으로 나타낸다. 맞바람 차폐효과(shielding effect) 때문에, 최대의 C_D 는 일반적으로 30° 의 바람 각도에서 나타나고 0° 의 바람 각도에서는 작아진다(Figure 3.27). 항력은 선체중심선 x 축 방향에 작용하는 힘이다.

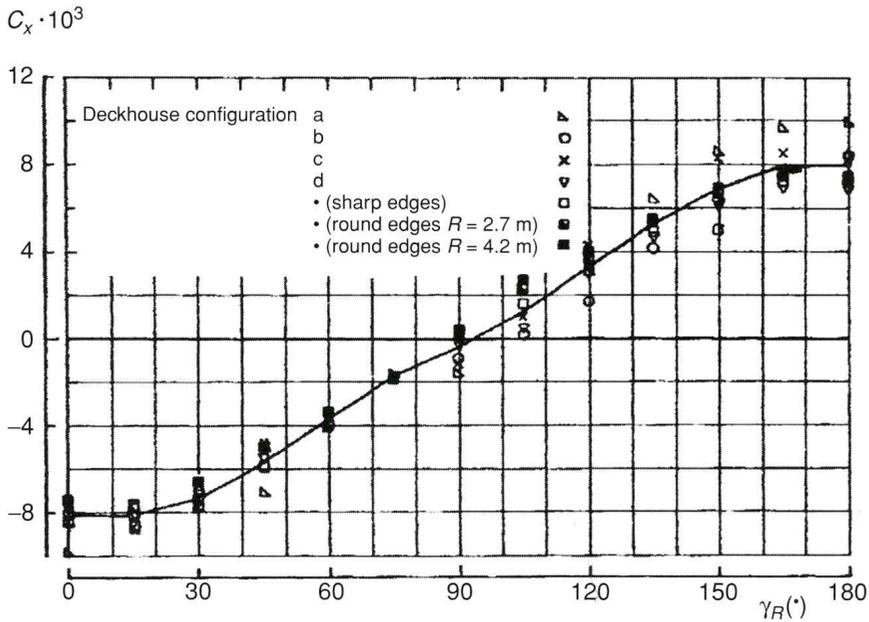


Figure 3.28. Wind coefficient curves [3.44].

일반적인 선체모델의 풍동터널 시험결과에 따르면 유선형 선루에 대해 약

22 선체저항특론

$C_D = 0.80$ 이고, 수면 위 선체에 대해 약 $C_D = 0.25$ 값을 주고 있다. 사용할 수 있는 데이터가 없을 경우 ITTC에서는 공기저항을 $C_{AA} = 0.001A_T/S$ 를 사용하기를 권장한다. 여기서 A_T 는 수선 위 선체 및 선루의 전방 투영면적이고, S 는 선체 침수표면적이다. 이 경우, $D_{air} = C_{AA} \times 0.5\rho_w S V^2$ 이다. 상선에 대한 전형적인 공기저항 값은 Shearer and Lynn [3.45], White [3.46], Gould [3.47], Isherwood [3.48], van Berlekom [3.49], Blendermann [3.50], Molland and Barbeau [3.51]에서 찾아볼 수 있다.

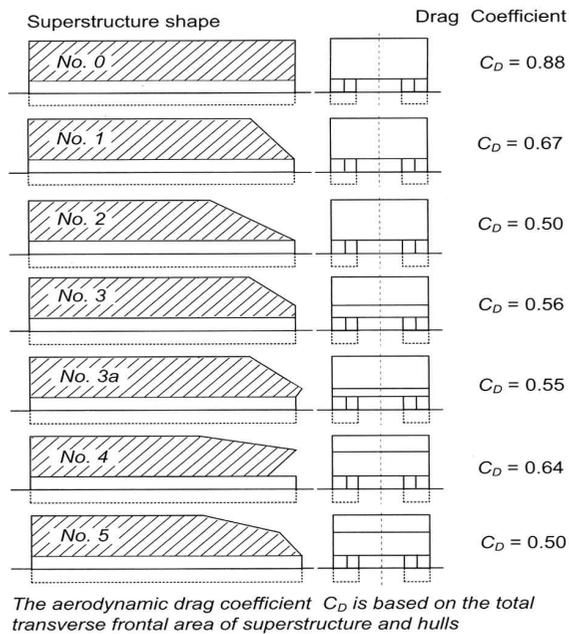


Figure 3.29. Drag on the superstructures of fast ferries [3.51].

Isherwood의 길이방향 x 에 대한 공기저항 데이터에 대한 회귀방정식은

$$C_X = A_0 + A_1 \left(\frac{2A_L}{L^2} \right) + A_2 \left(\frac{2A_T}{B^2} \right) + A_3 \left(\frac{L}{B} \right) + A_4 \left(\frac{S_P}{L} \right) + A_5 \left(\frac{C}{L} \right) + A_6(M) \quad (3.52)$$

여기서
$$C_X = \frac{F_X}{0.5\rho_A A_T V_R^2} \quad (3.53)$$

ρ_A 는 공기밀도(Appendix A1에서 Table A1.1), L 은 전체길이, B 는 선폭, A_L 은 측면투영면적, A_T 는 전방 투영면적, S_p 는 수선을 제외한 모형(선박)과 마스트와 통풍구와 같은 세장체(slender body)의 측면투영의 둘레길이, C 는 선수로부터 측면투영면적의 도심까지의 거리, M 은 측면투영에서 본 마스트 또는 king posts의 distinct groups의 수이다.

계수 $A_0 - A_6$ 는 부록 Table A3.1에 나타내었다. 표에 따르면, 180° 맞바람일 때 A_4 와 A_6 는 0이고 S_p 와 M 의 계산은 필요하지 않다. 예비 추정치(preliminary estimates)로, $C/L=0.5$ 를 사용할 수 있다.

단동체 고속 페리 [3.51]의 전형적인 선루에 대한 풍동터널 시험으로부터 C_D 의 예들을 Figure 3.29에 나타내었다.

바람에 의한 ISO 저항 증가 추정

선박의 시운전 시 바람의 저항계산에 대한 ISO 절차는 다음과 같다.

공기 및 바람 저항은

$$R_{AA} = 0.5\rho_A \cdot C_{AA0} \cdot K(\psi_{WR}) \cdot A_{XV} \cdot V_{WR}^2 \tag{A-1}$$

$$C_{AA}(\psi_{WR}) = C_{AA0} \times K(\psi_{WR}) \tag{A-2}$$

여기서,

A_{XV} : 바람에 노출되는 최대 횡단면적(m^2)

$C_{AA}(\psi_{WR})$: 바람 저항 계수

C_{AA0} : 맞바람에서의 바람 저항 계수

$K(\psi_{WR})$: 바람 저항의 방향 계수

V_{WR} : 상대 바람 속도 (m/s)

24 선체저항특론

ψ_{WR} : 상대 바람 각도 (rad)

ρ_A : 공기 밀도 (kg/m³)

맞바람에서의 풍저항 계수와 바람저항 방향계수는 풍동시험의 데이터를 기반으로 해야 한다. 모형시험 데이터는 Figure A.1 과 A.2에서 주어진다.

유사 타입 실적선이 있는 경우는 그 데이터를 모형시험 수행대신 사용해도 된다. 특이한 형상의 상부구조를 갖는 선박과 같이 적절한 데이터가 없을 때에는 모형시험을 통한 데이터 사용을 권장한다.

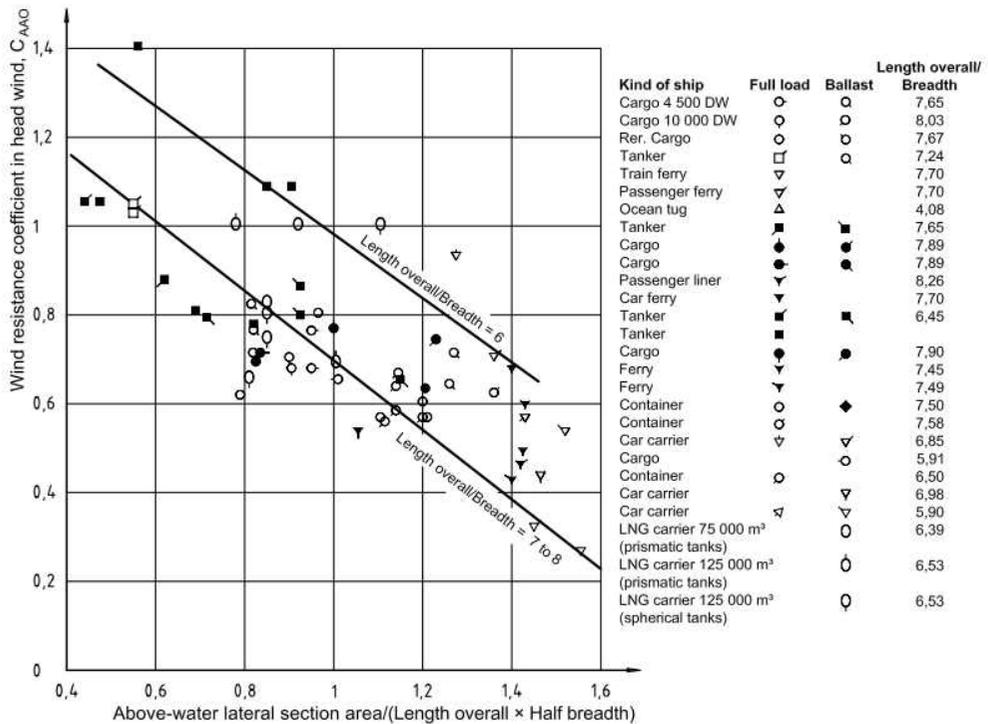


Figure A.1 Wind resistance coefficient in head wind

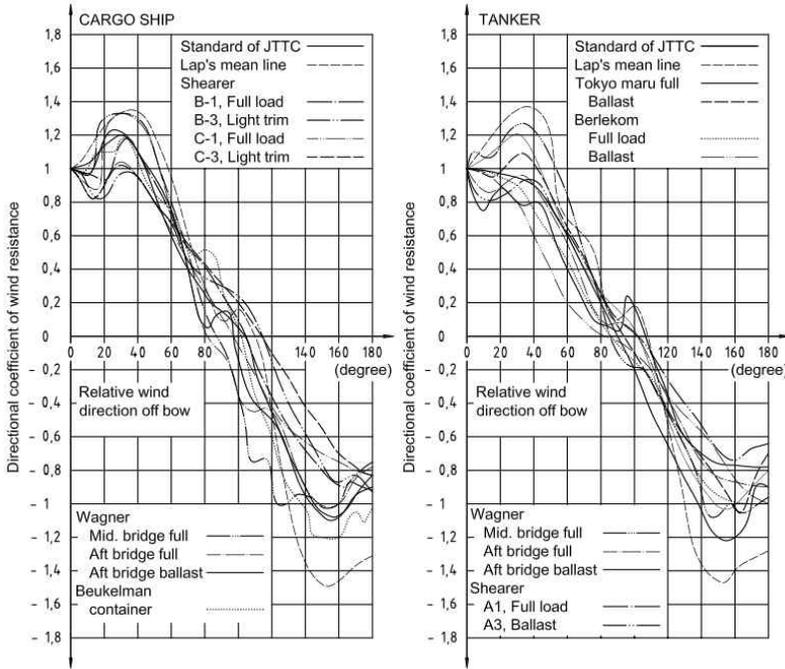


Figure A.2 Directional coefficient of wind resistance

3.2.2.4 CFD 응용

CFD는 선루 뒤의 흐름을 연구하는데 사용되어져왔다. 대부분의 연구는 작용하는 힘보다는 흐름의 특성에 관심을 가져왔다. 이러한 연구는 연돌(funnel uptakes) 주위의 흐름, 헬리콥터 착륙장이 있는 군함의 선루 뒤 흐름과 여객선 상갑판에 있는 레저 시설(leisure area) 주위의 유동에 효과적으로 사용되어 최적 형상설계에 사용되어져 왔다(Reddy et al. [3.52], Sezer-Uzol et al. [3.53], Wakefield et al. [3.54]). Moat et al. [3.55, 3.56]은 실제 선박의 선루에서 계측을 통해 선체와 선루에 의해 발생하는 유동 현상(flow distortion)을 수치해석과 비교하였다. 실험 및 전산유체역학을 사용하여 공기반류에 대한 최근 연구 동향 및 요약은 ITTC [3.57]에 참고할 수 있다.

3.2.2.5. 공기저항의 감소

박스 형상의 선루를 가진 상선의 선루 항력에 대한 개선은 모서리를 둥글게 (rounding)함으로써 달성될 수 있다. 뾰족한 모서리를 둥글게 하는 것은, 특히 박스 형상의 뭉뚱한 물체에 이점이 있다, Hoerner[3.37]과 Hucho[3.58]. 그러나

최소 $r/B_s = 0.05$ (여기서 r 은 모서리 곡면 반경, B_s 는 선루의 폭)의 곡률은 항력에 있어 중요한 요소이다. 이 값 혹은 이보다 큰 경우 15%–20%의 항력 감소는 직사각형 박스 형상에서 얻어질 수 있다. 그러나 이미 유선형으로 만들어진 선루에 대해서는 이러한 양의 저항 감소는 기대하기 힘들다.

대형 유조선에 대한 선루 항력을 감소시키는 자세한 연구는 [3.59]에 보고되었다.

대형 고속페리의 선루 항력에 대해 Molland and Barbeau [3.51]의 연구는 비교적 뭉뚱한 형상에 대해 약 0.8로부터 좋은 유선형 앞 끝단을 가진 형상의 경우 0.5로 항력계수가 작아짐을 보였다(Figure 3.29).

3.2.2.6 바람 기울기 영향

정지한 공기저항과 수직으로 속도 기울기가 있는 바람에서의 저항은 큰 차이가 있다. 공기저항은 상대바람 속도의 제곱에 비례하기 때문에 바람 속에서 운항할 때는 공기저항이 상당히 증가할 것이다. 이는 Section 3.2.4에서 논의될 것이다. 바람이 없는 공기의 속도 V_s 에서 운항하는 선박의 상대 공기속도는 Figure 3.30(a)에 나타내었고, 바람 속도 V_w 에서 운항하는 경우는 Figure 3.30(b)에 나타내었다.

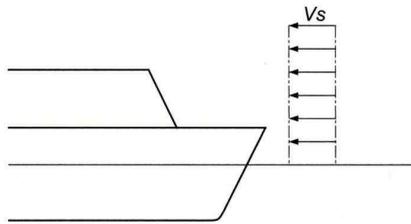


Figure 3.30. (a) Relative velocity in still air.

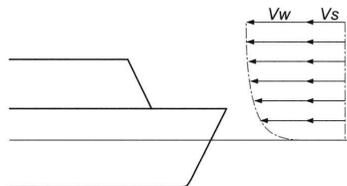


Figure 3.30. (b) Relative velocity in head wind.

일반적으로 상대 바람의 속도 측정은 마스트 헤드(mast head) 또는 브리지 윙(bridge wing) 같은 높은 곳에서 한다. 수면 근처에서의 상대속도는 아주 낮다.

바람 기울기의 근사식은

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (3.54)$$

여기서 n 은 $1/5 - 1/9$ 이다. 지수 n 은 수면 조건과 온도 기울기에 따라 변한다.

3.2.2.7 기울기 영향의 예

정사각형 박스 위의 유동을 고려해보자(Figure 3.31). V_0 는 $h = h_0$ 인 박스의 맨 위에서 측정되었다. $V/V_0 = (h/h_0)^{1/7}$, b 와 C_D 는 박스에서 일정하다고 가정하자.

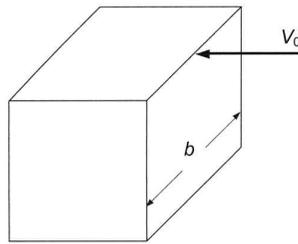


Figure 3.31. Illustration of wind gradient effect.

바람 기울기에서 저항은

$$R = \frac{1}{2} \rho b C_D V_0^2 \int_0^{h_0} \left(\frac{h}{h_0} \right)^{2/7} dh$$

즉

$$R = \frac{1}{2} \rho b C_D \frac{V_0^2}{h_0^{2/7}} \left[h^{9/7} \cdot \frac{7}{9} \right]_0^{h_0}$$

그리고

$$R = \frac{1}{2} \rho b C_D V_0^2 \cdot \frac{7}{9} h_0 = \frac{7}{9} R_0 = 0.778 R_0 \quad (3.55)$$

모형시험결과는 이러한 정도의 R/R_0 을 나타낸다. 선박 시운전 결과에 적용될 공기저항의 수정은 Section 5.4에서 논의될 것이다.

3.2.2.8 그 밖의 바람 영향

1. 맞바람에서 약간 벗어난 선수 바람의 경우, 선체를 바람방향으로 돌리려는 힘과 모멘트가 발생한다. 이를 방지하기 위해 타를 사용하는데 이로 인해 저항이 증가한다. 이러한 힘과 모멘트는 바람에 의해 유발된 힘과 모멘트로서 정의되고 직접적인 바람의 힘에 비해 상대적으로 아주 작다 (van Berlekom [3.44], [3.49]). 그러나 조종성에는 부정적인 영향을 미친다.
2. 바람은 바람속도의 2% - 3% 정도의 크기인 해상 수면 표류(surface drift)를 발생시킨다. 이것은 선박의 속도를 증가시키거나 감소시킬 수 있다.

부록

Table A1.1. Density of fresh water, salt water and air

Temperature, °C		10	15	20
Density kg/m ³	FW	1000	1000	998
	SW	1025	1025	1025
[Pressure = 1 atm]	Air	1.26	1.23	1.21

Table A3.1. Isherwood wind resistance coefficients

Isherwood wind force coefficients							
γ_R (deg.)	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	2.152	-5.00	0.243	-0.164	-	-	-
10	1.714	-3.33	0.145	-0.121	-	-	-
20	1.818	-3.97	0.211	-0.143	-	-	0.033
30	1.965	-4.81	0.243	-0.154	-	-	0.041
40	2.333	-5.99	0.247	-0.190	-	-	0.042
50	1.726	-6.54	0.189	-0.173	0.348	-	0.048
60	0.913	-4.68	-	-0.104	0.482	-	0.052
70	0.457	-2.88	-	-0.068	0.346	-	0.043
80	0.341	-0.91	-	-0.031	-	-	0.032
90	0.355	-	-	-	-0.247	-	0.018
100	0.601	-	-	-	-0.372	-	-0.020
110	0.651	1.29	-	-	-0.582	-	-0.031
120	0.564	2.54	-	-	-0.748	-	-0.024
130	-0.142	3.58	-	0.047	-0.700	-	-0.028
140	-0.677	3.64	-	0.069	-0.529	-	-0.032
150	-0.723	3.14	-	0.064	-0.475	-	-0.032
160	-2.148	2.56	-	0.081	-	1.27	-0.027
170	-2.707	3.97	-0.175	0.126	-	1.81	-
180	-2.529	3.76	-0.174	0.128	-	1.55	-