한국해양환경 · 에너지학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environment and Energy
Vol. 17, No. 3. pp. 198-204, August 2014

http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.3.198
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Articles

사고선박 예인력 계산을 위한 공기저항 간편 추정법 연구

김은찬† · 최혁진
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study on the Simplified Prediction Method of Air Resistance for Towing Force Calculation of Disabled Ships

Eun-Chan Kim† and Hyuek-Jin Choi
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 305-343, Korea

요 약

바다를 항해하는 선박은 수면 상부 선체가 공기저항을 받게 된다. 이 공기저항은 수면 상부 선체의 형상, 선속, 풍속 그리고 풍향의 영향을 받는다. 공기저항을 추정하는 실험적인 또는 통계적인 방법은 사고 선박의 예인력을 계산하는 중요한 절차 가운데 하나이다. 본 논문에서는 수면 상부 선체의 투영면적과 선속과 풍속과 풍향을 변수로 사용하여, 실험 또는 통계 분석 방법으로 공기저항을 간편하게 추정하는 방법을 보여주었다. 이 방법들은 기존의 사고선박 예인력 추정을 위한 전산 프로그램에 적용하였다.

Abstract – Ships sailing the seas encounter air resistance. The air resistance depends on the shape of the above-water hull, the ship speed, the wind speed and wind direction. The experimental or statistical methods which are used to predict the air resistance are one of the essential procedures of the calculation of the towing force of the disabled ships. This paper shows simplified air resistance prediction method using the variables of the projected area of the above-water hull, the speed of the ship, the wind speed and its direction. These methods have been applied to the existing computer program which had been set up to predict the towing force of the disabled ships.

Keywords: Disabled Ship(사고선박), Towing Force(예인력), Air Resistance(공기저항), Projected Area(투영면적), Wind Speed(풍속), Wind Direction(풍향)

1. 서 론

사고 선박의 예인력을 추정하기 위해서는 사고선박 자체의 정수중 선체 저항과 각종 외력에 대한 부가저항, 그리고 여기에 예인삭의 침수부분 저항을 합쳐서 계산하게 된다. 정수중 선체 저항은 선박의 침수 부분의 형상에 대한 저항으로, 가장 기본이 되는 저항 성분이다. 외력으로는 바람, 표류력, 선체표면 거칠기, 선체 파손, 프로펠러 고착, 파랑, 천수효과, 조류 등에 의한 부가저항을 들 수 있는데, 부가저항의 크기는 거친 해상 상태의 경우에는 정수중 선체 저항 값을 상회할 수도 있다(Choi[2012], Kim[2013]). 부가저항 가운데 비교적 값이 큰 것으로 바람 저항과 프로펠러 고착 저항과 파랑 저항을 들 수 있다.

바람이 없는 상태에서 운항하는 선박은 수면 윗부분이 정면으로 선속만큼의 공기저항을 받게 된다. 그러나 바람이 불 경우, 선속과 풍속의 합에 의한 공기저항, 즉 상대풍속에 따른 공기저항을 받게 될 것이다. 이 때 바람에 의해 생성되는 파랑의 영향은 별도로 생각하기로 하고, 본 연구에서는 제외하도록 하였다.

본 논문에서는 선체 수면 위 상부 구조물의 공기저항 값을 추정하는 기존의 실험 및 통계 해석 방법들을 비교하고, 합리적이고도 정확도가 높은 새로운 방법을 제시하고자 한다. 따라서, 선박의 공기저항을 추정하기 시작한 1930년대부터 현재에 이르기까지의 주요 추정방법을 모두 비교 검토하였고, 최적의 추정 방법을 찾아내었고, 그 계산 결과를 서로 비교하여 신뢰도를 확인하였다. 한편, 공기저항과 관련된 힘은 정면 저항, 후면 저항, 선체 측면 저항 그리고 요잉 모멘트로 나누어 볼 수 있는데, 본 논문에서는 정면 및 후면 저항만을 다루었다.

†Corresponding author: eckim@kriso.re.kr

2. 공기저항 추정 방법

1930년 G. Hughes 는 수면 위 선체 구조물에 대한 바람저항 추정식을 식 (1)과 같이 유도하고, 수중 시험을 통해 공기저항 계수 K가 0.5 내지 0.65 범위의 값을 가진다는 것을 찾아내었다(Hughes[1930]).

공기저항계수를 표시 할 때, 근래에는 대부분 공기저항을 $0.5\,\rho_A A_T V^2$으로 나누어 C_{AA}로 표시하고 있으나, 이 당시에는 $\rho_A A_T V^2$으로 나누어 K로 표시하였었다.

$$R_{AA} = K \times \rho_A \times V_R^2 \times \frac{A_L \sin^2\theta + A_T \cos^2\theta}{\cos(\alpha - \theta)} \tag{1}$$

한편, 1943년 D. W. Taylor는 맞바람을 받는 일반 선박의 경우, 공기저항은 이와 대등한 선박 즉 폭이 선폭과 같고, 높이가 선폭의 1/2인 평판을 풍속에 수직하게 놓았을 경우의 저항과 비례한다고 보고, 여러 차례의 풍동시험을 거쳐 공기저항 추정식을 식 (2)와 같이 도출하였다(Taylor[1943]).

$$\begin{aligned} R_{AA} &= 1.28 \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \\ &= 1.28 \times \frac{1}{2} \times 1.223 \times \frac{1}{2} B^2 V_R^2 \\ &= 0.783 \times \frac{1}{2} B^2 V_R^2 \end{aligned} \tag{2}$$

1969년 일본수조협의회(JTTC, Japan Towing Tank Conference)는 여러 가지 선박의 풍동시험 자료를 이용하여 식 (3)을 바탕으로 Fig. 1과 같은 정면 공기저항 계수(C_{AA0}) 곡선과 Fig. 2와 같은 풍향영향계수($k(\theta)$) 곡선을 만들어 발표하였다(ISO[2002]).

$$\begin{aligned} R_{AA} &= C_{AA}(\theta) \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \\ C_{AA} &= C_{AA0} \times k(\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

R. M. Isherwood 는 1972년 상선에 대한 풍동시험 자료를 바탕으로 식 (4) 및 (5)와 같은 공기저항 추정을 위한 회귀식을 만들어 발표하였는데, 상대풍향을 선수부터 선미까지 10도 간격으로 나누어, 풍향별로 각각 모두 19개의 회귀식을 만들었다(Isherwood[1972]).

$$R_{AA} = C_X \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} C_X &= A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L_{OA}^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L_{OA}}{B} \\ &\quad + A_4 \frac{A}{L_{OA}} + A_5 \frac{C}{L_{OA}} + A_6 M \pm 1.96\ S.E. \end{aligned} \tag{5}$$

ITTC는 1978년 추진성능 해석법을 발표하면서 식 (6), 식 (7)과 같이 공기저항 추정식을 간편하게 만들어 발표하였다(ITTC[1978]). 이 식에서는 밀도 값을 해수의 값으로 사용하고 대신 0.001을 곱해

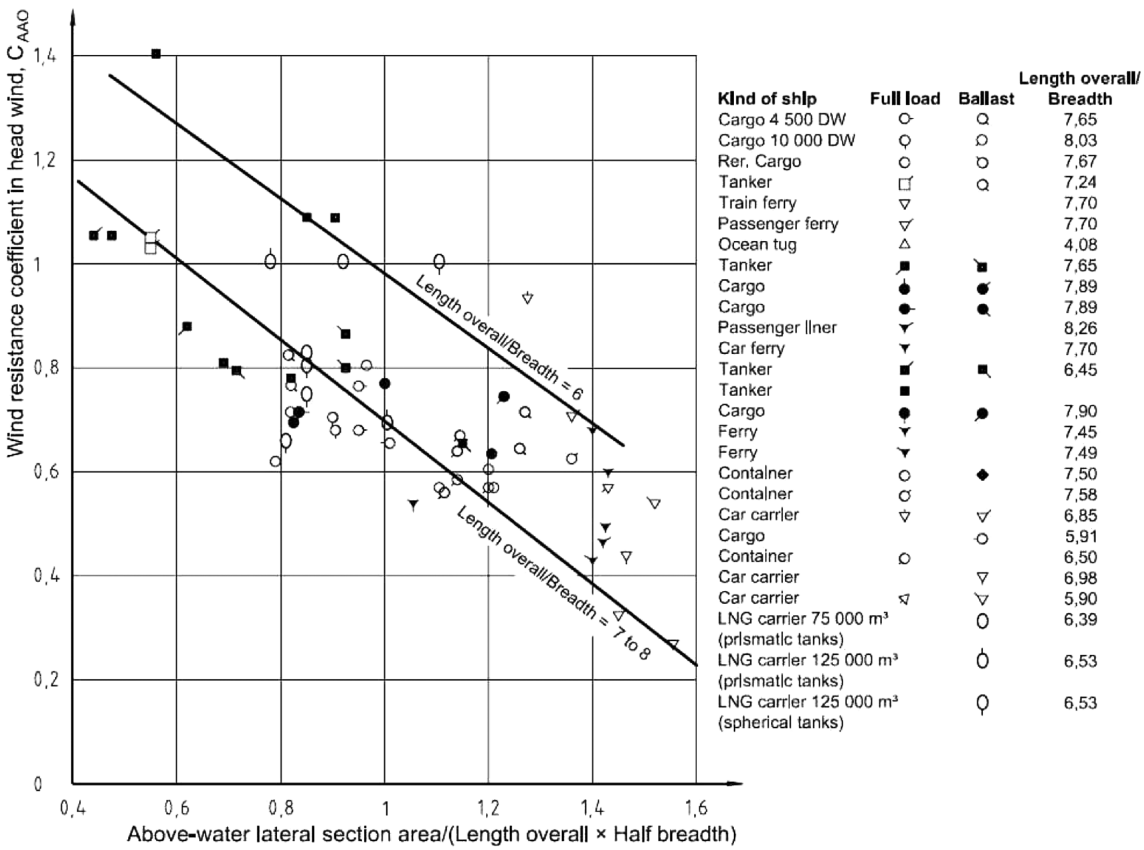

Fig. 1. JTTC wind resistance coefficient in head wind.

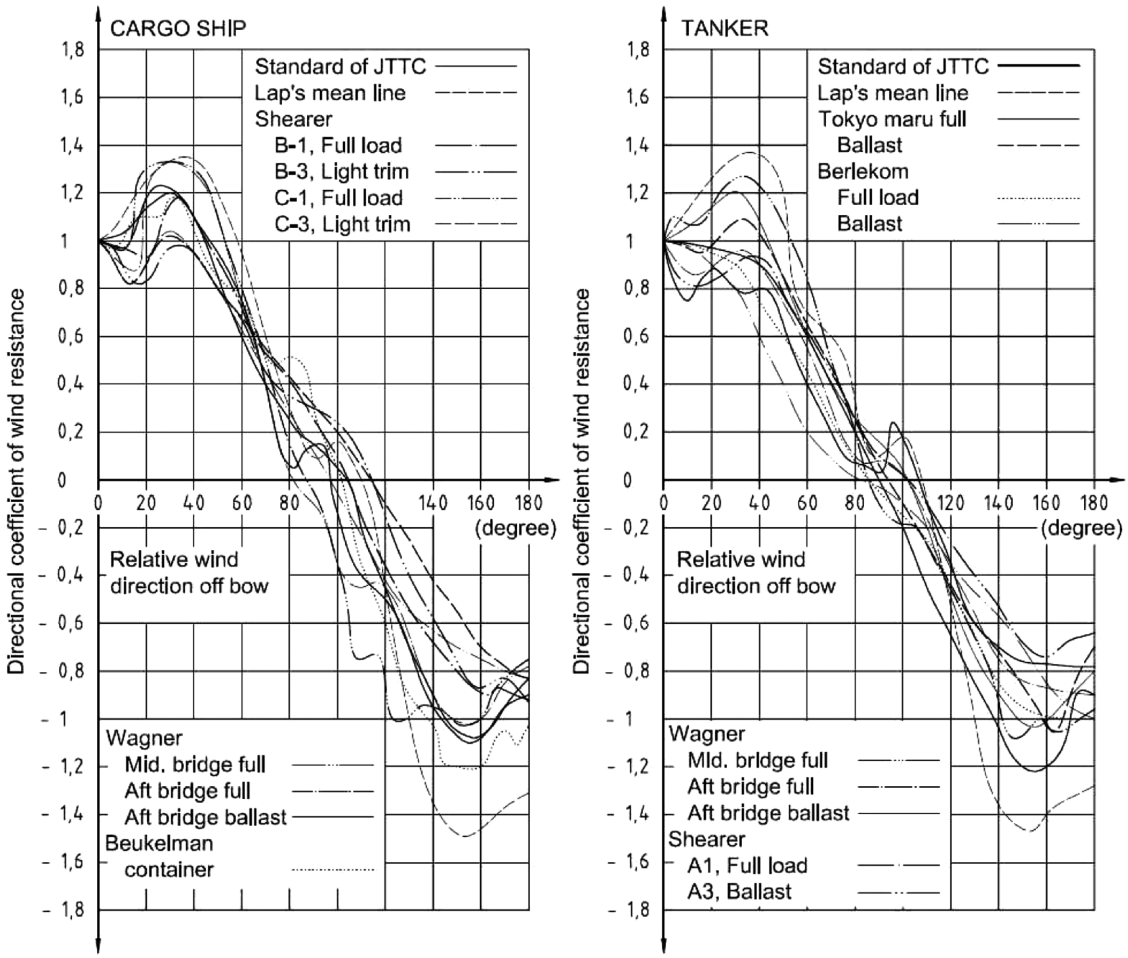

Fig. 2. JTTC directional coefficient of wind resistance.

줌으로서, 공기 밀도를 해수 밀도의 1/1000로 간주한 셈이다.

$$R_{AA} = C_{AA} \times \frac{1}{2}\rho_S S V_R^2 \tag{6}$$

$$C_{AA} = 0.001\frac{A_T}{S} \tag{7}$$

W. Blendermann은 1990년 여러 가지 선박의 수면 위 선체 구조물에 대한 풍동시험 결과를 이용하여 식 (8)을 바탕으로 공기저항계수 도표를 발표하였는데, 선체구조물의 형상들은 Fig. 3과 같다 (Blendermann[1990-1991]).

$$R_{AA} = C_X \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \tag{8}$$

3. 공기저항 추정 방법 비교

2장에서 검토한 공기저항 추정방법들을 종합 비교하여, 사고 선박의 공기저항을 간편하게 추정하는 방법을 도출하였다.

G. Hughes의 식 (1)에서 정면 및 후면 방향의 공기저항의 경우, 공기저항계수 값을 G. Hughes가 도출한 0.5 내지 0.65 가운데 0.6을 사용할 경우, 식 (9)와 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$R_{AA} = 1.20 \times \frac{1}{2}\rho_A V_R^2 A_T \tag{9}$$

D. W. Taylor는 식 (2)에서 정면투영면적 대신 선폭만을 이용하여 간편하게 공기저항을 추정하고자 하였다. 그러나, 현재 대부분의 선박에서는 정면투영면적을 쉽게 산출할 수 있고 계산도 간편하므로, 당초 D. W. Taylor가 의도하였던 정면투영면적을 포함시킨 공기저항식을 사용하면 식 (10)과 같이 된다.

$$R_{AA} = 1.28 \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \tag{10}$$

ITTC 1978년 추진성능 해석법은 모형시험을 통해 실선의 저항 추진 성능을 추정하는 과정에서 추가로 공기저항을 더해 주는 방법으로서, 밀도를 공기밀도 대신 해수 밀도를 사용하였다. 따라서, 공기저항 추정식 (6) (7)을 함께 표현하면서, 공기의 밀도를 1.223 kg/m^3, 해수의 밀도를 1025.87 kg/m^{3}로 간주하여 공기밀도로 나타내는 식을 도출하면 식 (11)과 같이 된다.

$$R_{AA} = C_{AA} \times \frac{1}{2}\rho_S S V_R^2$$

$$= 0.001 \times \frac{A_T}{S} \times \frac{1}{2}\rho_S S V_R^2$$

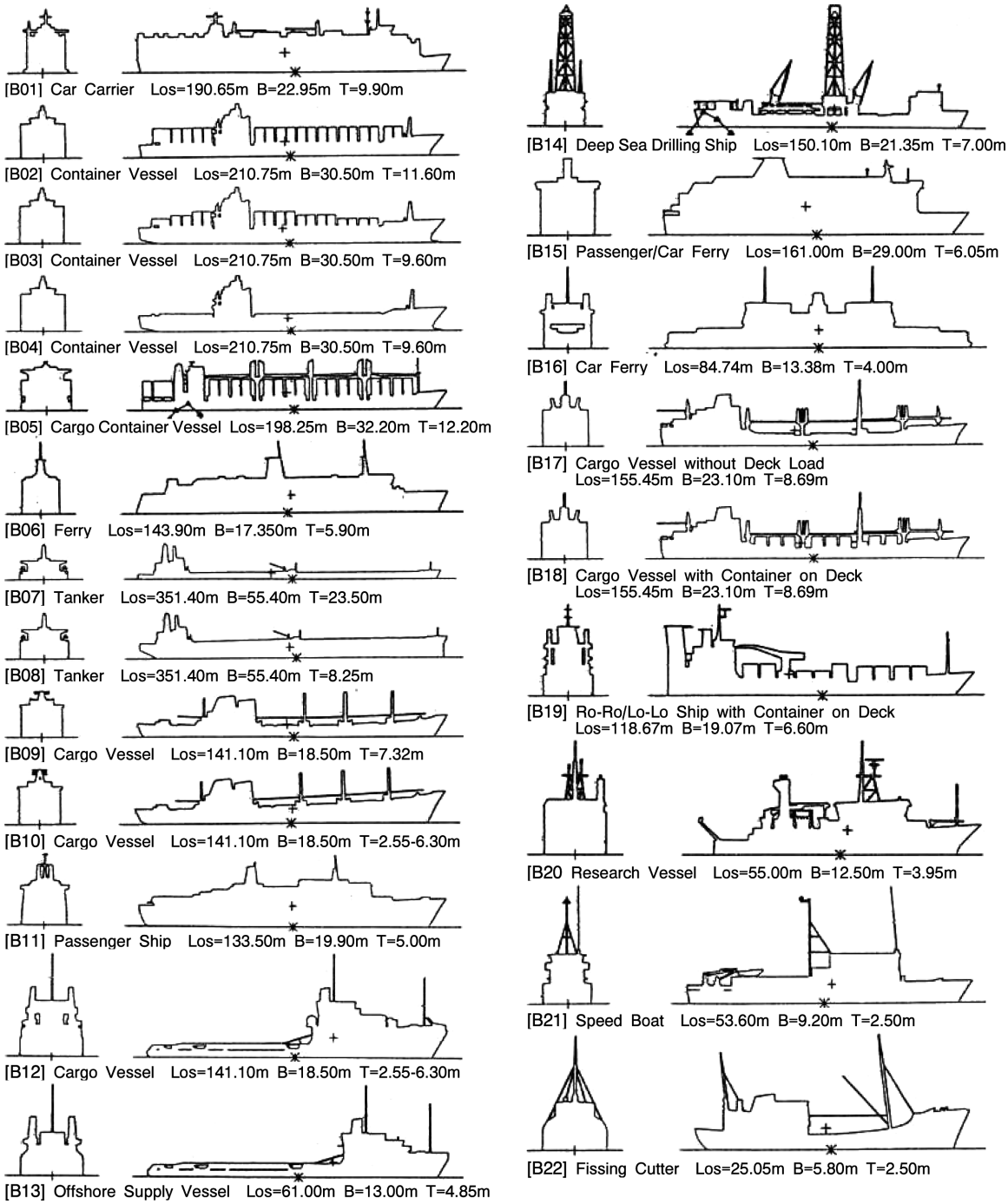

Fig. 3. Vessel profile of blendermann chart.

$$= 0.82 \times \frac{1}{2}\rho_A A_T V_R^2 \tag{11}$$

위와 같이, Hughes와 Taylor와 ITTC의 정면 방향의 공기저항 계수를 동일한 단위와 제원으로 비교하면, 각각 1.20, 1.28 및 0.82 로 도출된다.

R. M. Isherwood가 발표한 회귀식은 상대풍향을 10도 간격으로 나누어 선체 제원의 조합을 변수로 하는 수식이다. 이 식은 하나의 선체와 흘수 상태에 대해 상대풍향의 변화에 따라 각각 다른 회귀식을 사용하므로 계산 결과에 연속성이 없이 풍향 변화에 따라 갑자기 특이한 값을 나타내는 불합리한 면을 보여주고 있다.

한편, W. Blendermann이 수행한 각종 선박의 공기저항계수 도표의 곡선을 비교해 보면 Fig. 4의 Data B01부터 Data B22와 같다. 이렇게 매우 복잡하게 변하는 공기저항계수를 Hughes, Taylor 또는 ITTC의 간편식과 같이 1.20, 1.28 또는 0.82 등 하나의 대표값을 사용하여 추정할 수는 없다고 판단된다. 그럼에도 불구하고, 국내의 관련업계에서는 단순히 하나의 값을 사용하고 있다.

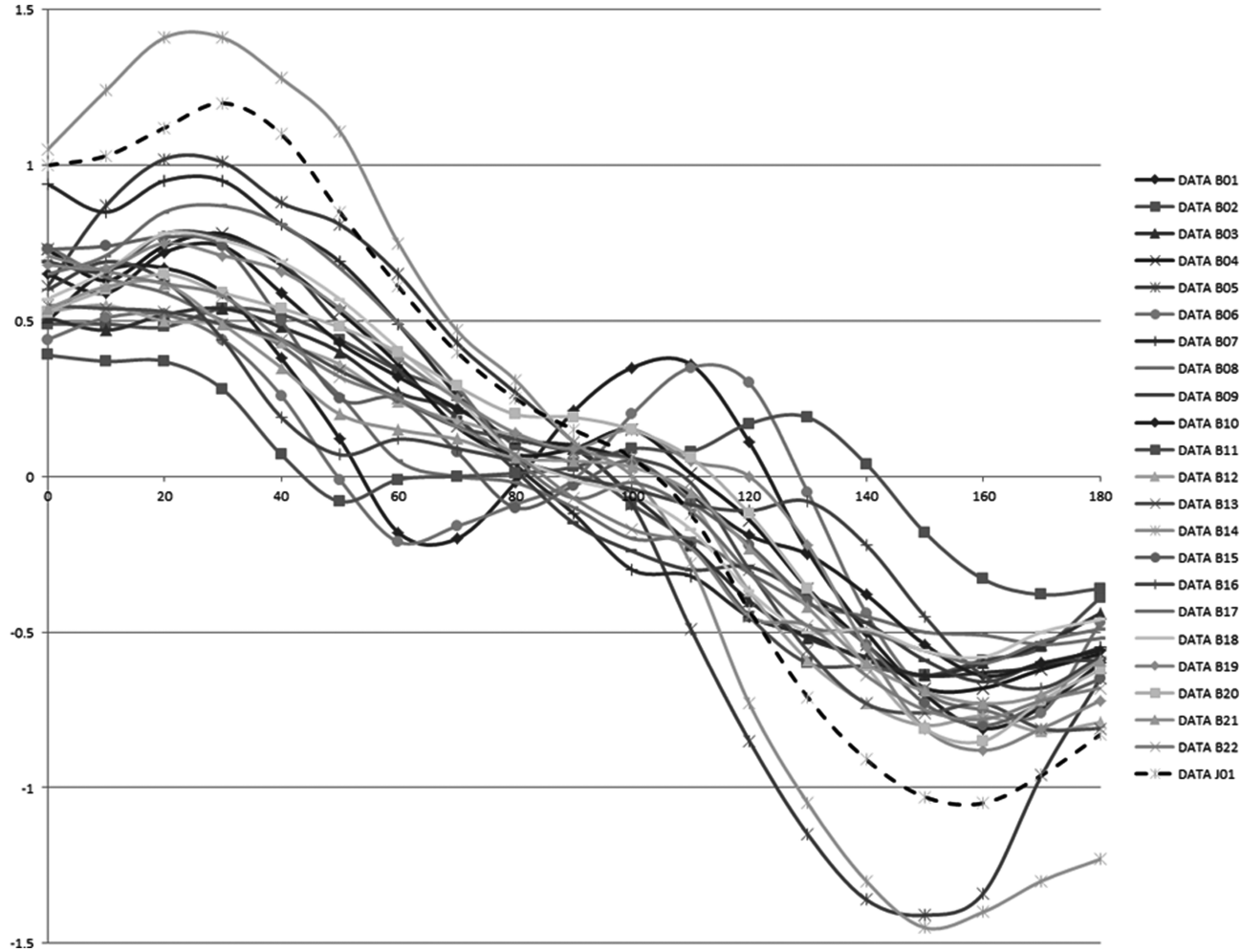

Fig. 4. Comparison of Blendermann chart and JTTC chart for directional coefficient of air resistance.

Fig. 4에서는 또한, JTTC의 공기저항계수 곡선을 점선으로 표시하여 Blendermann의 곡선들과 비교하고 있다. 그러나 이 때의 JTTC 곡선은 선수 정면의 공기저항계수를 1.0 으로 하여 상대풍향의 변화에 따른 공기저항계수의 변동을 나타낸 것이고, 정면의 공기저항계수를 얼마로 할지는 Fig. 1과 같이 배의 길이와 선폭 그리고 측면 투영면적의 비율에 따라 0.4 내지 1.1 범위에서 변동하는 것으로 되어 있다. 그러나 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 선종별 및 흘수상태별로 분산이 크므로 정확한 추정값을 얻기에는 문제가 있다고 판단된다.

4. 비교 분석 결과

이와 같은 각종 공기저항 추정 방법의 비교 검토를 통해, 우리는 공기저항 추정을 위해서는 각각의 선체에 대한 풍동시험 결과를 활용하여 계산하는 것이 바람직하다는 점을 확인하였다. 특히 현재는 컴퓨터의 발달과 정보화의 영향을 받아 풍동시험 결과를 활용하는 것이 어렵지 않다고 판단된다. 따라서, Fig. 3의 Blendermann이 수행한 것과 같이 풍동시험을 수행하거나 기존자료를 수집하여 컴퓨터에 저장하고, 그로부터 손쉽게 유사한 선형을 찾아서 해당 풍동시험 결과를 활용하여 공기저항을 계산하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Fig. 5는 하나의 예로서, ISO 속력시운전 표준에서 예제 계산으로 사용한 30만톤급 유조선의 만재상태의 경우에 대해, 공기저항을 Hughes 간편식 방법, Taylor 간편식 방법, ITTC 간편식 방법, Isherwood 회귀식 방법, JTTC 곡선 방법 그리고 Blendermann 도표 직접 사용 방법으로 각각 계산하여 그 결과를 비교하고 있다. 이 때, 정면 투영면적은 1,100 m^2, 절대풍속은 4.5 m/s, 절대풍향은 선수 25 deg 이었다.

Fig. 6은 또 다른 예로서, 8,000톤급 일반화물선의 경하상태의 경우에 대해, 공기저항을 Hughes 간편식 방법, Taylor 간편식 방법, ITTC 간편식 방법, Isherwood 회귀식 방법, JTTC 곡선 방법 그리고 Blendermann 도표 직접 사용 방법으로 각각 계산하여 그 결과를 비교하고 있다. 이 때, 매우 큰 풍속의 값을 비교해 보기 위해 정면 투영면적은 399 m^2, 절대풍속은 25.0 m/s, 절대풍향은 선수 30 deg 로 간주하였다.

Fig. 5와 6에서 보여주고 있듯이, Blendermann 풍동시험 도표를 이용한 값을 기준으로 할 때, 다른 방법으로 추정한 값과 약 50% 가

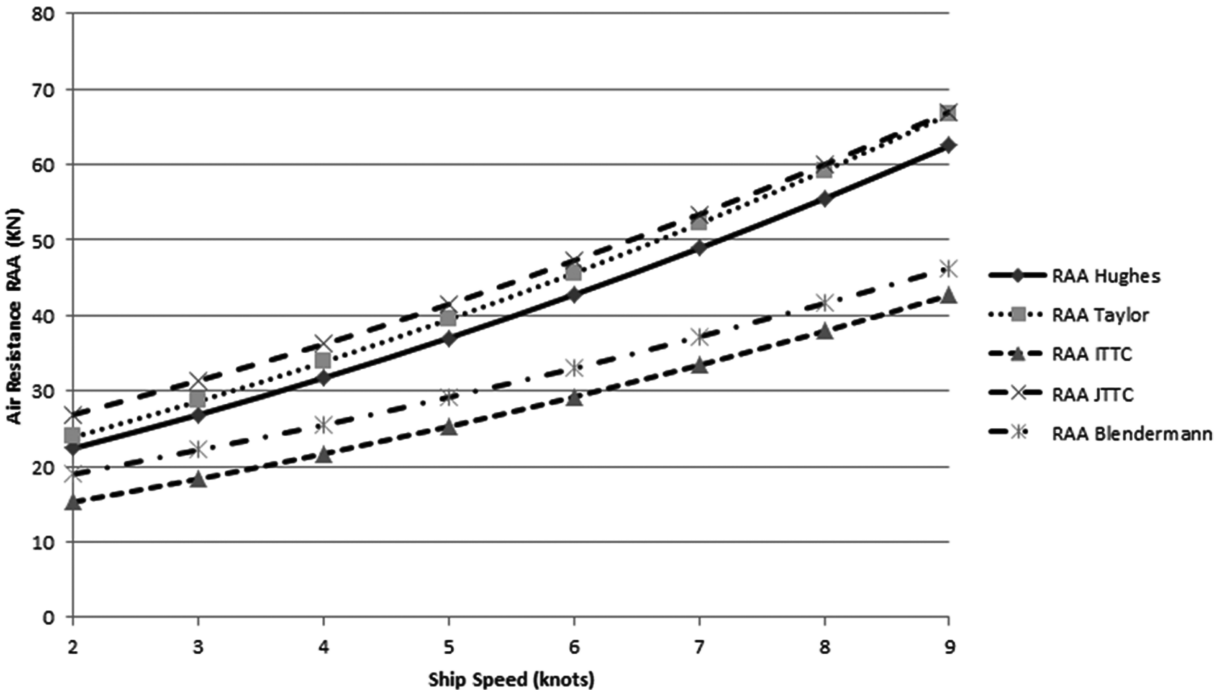

Fig. 5. Comparison of air resistance between various prediction methods for 300 K tanker.

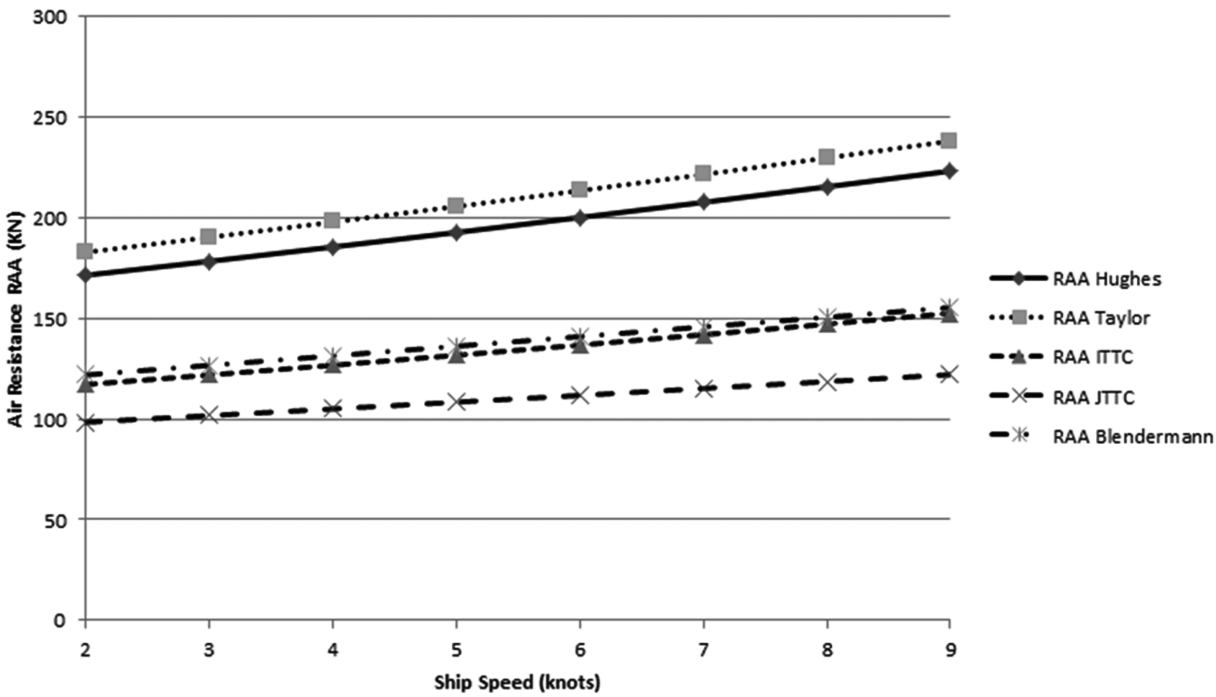

Fig. 6. Comparison of air resistance between various prediction methods for 8 K general cargo.

량 차이가 남을 보여주고 있다. 다른 여러 가지 종류의 선박에 대해 계산을 할 경우에도 서로 다른 큰 차이를 보여주게 된다. 따라서 풍속이 크거나 수면 위 선체의 면적이 커서 공기저항의 비율이 타 저항 성분에 비해 클 것으로 판단되는 경우에는 가능한 한 Blendermann과 같은 풍동시험 결과를 직접 이용하여 추정하는 것이 타당하다고 판단된다. 단, 바람저항의 비중이 그다지 크지 않을 것으로 판단되는 경우에는 JTTC 곡선 방법으로 추정하는 것도 무방하다고 판단되고, 안전율을 많이 줄 경우 아주 간편한 ITTC 방법을 사용하는 것도 고려해 볼만 하다고 판단된다.

위와 같은 분석 결과에 따라, 선박해양플랜트연구소에서 개발한 사고 선박 예인시 저항 추정 프로그램 PNT2에 공기저항을 추정하는 방법으로, JTTC 곡선 방법 외에 Isherwood 회귀식 방법과 Blendermann

도표 직접 사용 방법을 추가하여, 보다 간편하고도 정확하게 공기저항을 추정할 수 있도록 하였다.

5. 결 론

사고선박의 예인력 계산을 위한 공기저항 간편 추정법 비교 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 기존에 널리 사용되는 선박의 공기저항 추정 방법으로서, Hughes 간편식 방법, Taylor 간편식 방법, ITTC 간편식 방법, Isherwood 회귀식 방법, JTTC 곡선 방법, Blendermann 도표 직접 사용 방법을 비교 검토한 결과, 추정 방법에 따라 그 차이가 매우 큼을 확인하였다.

(2) 다양한 선박에 대해 정확하게 공기저항을 추정할 수 있는 단순한 계수의 도출은 불가하다고 판단되었고, 가능한한 풍동시험 결과를 이용하는 방법을 사용하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

(3) 풍동시험 결과를 직접 사용하여 공기저항을 추정하는 방법을 정립하고 이를 전산화하여, 사용자가 간편하고도 정확하게 공기저항을 추정할 수 있도록 개발하였다.

(4) 사고 선박 예인시 보다 정확하게 공기저항을 추정하기 위해서는, 기존에 활용할 수 있는 Blendermann 풍동시험 도표에 만족하지 않고, 보다 다양한 선박 그리고 우리 나라에서 사고의 우려가 많은 선박에 대해 풍동시험을 미리 수행해 두어서, 필요시 즉시 사용할 수 있는 체제를 확립하는 것이 필요하다고 판단된다.

기 호

A_L : 측면 투영면적(m^2)
A_T : 정면 투영면적(m^2)
B : 선폭(m)
C : 측면투영면적 중심에서 선수까지 거리(m)
C_{AA} : 공기저항 계수 ($\frac{1}{2}\rho_A A_T V^2$으로 무차원화)
C_{AA0} : 정면 공기저항 계수
k : 공기저항의 풍향영향계수
K : 공기저항 계수($\rho_A A_T V^2$으로 무차원화)
L_{OA} : 배의 전장(m)
M : 측면 투영 형상의 구분 개수
R_{AA} : 공기저항(N)
S : 배의 침수표면적(m^2)
$S.E.$: 표준 오차
V_R : 상대 풍속(m/s)
α : 절대 풍향(deg)
θ : 상대 풍향(deg)
ρ_A : 공기 밀도(kg/m^3)
ρ_S : 해수 밀도(kg/m^3)

후 기

이 논문은 2013년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(지능형 해양사고 예방 및 구난기술 개발-사고선박 예인지원 요소기술 및 구난체계 개선 연구)의 결과물입니다.

References

[1] Blendermann, W., 1990-1991, “Chapter 3.1 External Forces, Wind Forces of Manoeuvring Technical Manual”, Schiff & Hafen 1990:2, 1990:3, 1991:4.
[2] Choi, H.J. and Kim, E.C., 2012, Development of the Ship Resistance Calculation Program for Prediction of Towing Forces for damaged Ships, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol.15, No.2 (Korean)
[3] Hughes, G., 1930, Model Experiments on the Wind Resistance of Ships, Trans. INA.
[4] Isherwood R.M., 1972, Wind Resistance of Merchant Ships, Trans. RINA.
[5] ISO, 2002, Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, International Standard ISO 15016.
[6] ITTC, 1978. Report of Performance Committee, Proceedings 15th ITTC.
[7] Kim, E.C., Choi, H.J. and Lee, S.G., 2013, A Study on the Hull Resistance Prediction Methods of Barge Ship for Towing Force Calculation of Disabled Ships, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol.16, No.3 (Korean).
[8] Taylor, D.W., 1943, The Speed and Power of Ships, Second Version.

Received 13 May 2014
Revised 13 June 2014
Accepted 16 June 2014