

사고선박 예인력 계산을 위한 바지선의 선체 저항 성능 추정법 연구

김은찬[†] · 최혁진 · 이승국
한국해양과학기술원

A Study on the Hull Resistance Prediction Methods of Barge Ship for Towing Force Calculation of Disabled Ships

Eun-Chan Kim[†], Hyuek-Jin Choi and Seung-Guk Lee

Korea Institute of Ocean Science and Technology

요 약

대부분의 사고선박 예인력 계산을 위한 선체저항 성능 추정은 매우 간단하고 오래된 방법을 사용하고 있는데, 특히 바지선의 경우는 미국 해군 예인 매뉴얼에서 사용하는 방법과 유사한 방법을 사용하고 있다. 본 논문에서는 미국 해군 예인 매뉴얼 방법과 국내 해양수산부 고시 방법을 검토한 결과, 이는 비합리적이고 부정확한 추정 방법임을 밝혔다. 나아가, 바지선에 적용할 수 있는 합리적이고도 정확한 저항 성능 추정 방법으로 새로운 Modified-Yamagata-Barge 방법을 도출하였다.

Abstract – Most of hull resistance prediction methods which are used to calculate the towing force of disabled ships are very simple and old-fashioned. In particular, in cases of barge ships, a method similar to the US Navy Towing Manual is being used. This paper reviewed the US Navy Towing Manual and the notification method of Korea Ministry of Oceans and Fisheries and proved that these prediction methods are irrational and inaccurate. Furthermore, a new Modified-Yamagata-Barge method is introduced as a more rational and accurate resistance prediction method which can be applied in case of barge ships.

Keywords: Disabled Ship(사고선박), Towing Force(예인력), Barge Ship(바지선), Hull Resistance(선체저항), Frictional Resistance(마찰저항), Residual Resistance(잉여저항)

1. 서 론

최근 5년간의 국내 선박의 사고 사례를 보면, 100톤 미만의 소형선박이 약 75%를 차지하며, 선종별로 분류하면 73%가 어선이고, 13%가 예선이나 바지선 등의 특수 소형선이므로 이들에 대한 보다 정확한 추정 방법의 정립이 필요하다고 본다.

사고 선박의 예인력을 추정하기 위해서는 사고선박 자체의 정수 중 선체 저항과 각종 외력에 대한 부가저항, 그리고 여기에 예인사의 침수부분 저항을 합쳐서 계산하게 된다. 정수중 선체 저항은 선박의 침수 부분의 형상에 대한 저항으로, 가장 기본이 되는 저항 성분이다. 외력에 대한 부가저항은 바람, 표류력, 선체표면 거칠기, 선체 파손, 프로펠러 고착, 파랑, 천수효과, 조류 등을 들 수

있는데[3], 그 크기는 거친 해상 상태의 경우 정수중 선체 저항값을 상회할 수도 있다. 예인사 저항은 예인 방법에 따라 각각 발생하는 예인사의 침수 부분 저항을 합산하여 구하게 되는데, 대부분의 경우 선체 저항의 10% 미만의 값으로서, 큰 비중을 차지하지 않는다.

본 논문에서는 바지선의 선체 저항값을 추정하는 기존의 방법들을 비교하고, 합리적이고도 정확도가 높은 새로운 방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 서로 다른 선체 저항 추정 방법을 비교하는 것으로서, 각 방법에서 사용하는 기호와 단위를 그대로 쓰는 것이 적절하다고 판단하여 각각 원래의 기호와 단위를 표현하다 보니, 함께 묶는 것이 도리어 혼란을 주므로, 기호와 단위 설명은 따로 모아 정리하지 않고 각각의 본문에서 설명하였다.

[†]Corresponding author: eckim@kiost.ac

2. 기존의 바지선 예인저항 추정

2.1 미국해군 예인 저항 추정 방법

사고선박의 예인력 계산 방법 가운데 전세계적으로 많이 사용되고 있는 것이 미국해군이 개발한 방법이다[6]. 이 미국 해군 예인 매뉴얼에서 사용하는 선체 저항 계산 방법은 컴퓨터가 사용되기 전 수작업으로 계산하던 때에 만들어진 경험적인 방법으로, 오래된 방법이기도 하지만, 과대 추정이 큰 문제가 되지 않는다고 판단하여 널리 사용되고 있는 방법이다. 그러나 이 방법은 군함과 지원선에 대한 방법이기도 다양한 선박에 적용하기에는 부적절한 측면이 있다. 그럼에도 불구하고, 이 미국해군 방법은 미국 Herbert사와 미국 ABS 선급이 공동으로 개발한 구난 대응 소프트웨어(HECSALV)[1]에서도 사용되는 등 사고선박 구난 분야에서 널리 사용되고 있다. HECSALV 프로그램에서 군함과 바지선은 미국해군 방법을 사용하였고, 일반 상선에 대해서는 J. Holtrop 방법[2]을 사용하였다.

미국해군 예인 매뉴얼에서 사용하고 있는 바지선의 전체 저항 추정 방법은 식 (1)과 같다.

$$R_T = R_F + G + W \tag{1}$$

단,

R_T : 피예인 선박의 전체 저항(Pounds)

R_F : 평판마찰저항(Pounds)

$$R_F = f_1 \cdot S \cdot (V/6)^2 \tag{2}$$

f_1 : 선체표면 상태계수

S : 침수 표면적(ft²)

V : 선속(knots)

G : 조파저항(Pounds)

$$G = 2.85B \cdot f_2 \cdot V^2 \cdot K \tag{3}$$

B : 수면하 선체 횡단면적(ft²)

f_2 : 선수 형상계수

V : 선속(knots)

K : 거친 해상상태 보정계수

W : 공기저항(Pounds)

$$W = C \cdot 0.004(V_W + V)^2 \cdot f_3 \tag{4}$$

C : 수선 상부 횡단면적(ft²)

V_W : 풍속(knots)

V : 선속(knots)

f_3 : 수선상부 형상계수

(2) 식에서 평판마찰저항을 계산하기 위한 선체표면 상태계수 f_1 은 선체 표면 상태에 따라 0.45에서 0.80 사이의 값을 주도록 하였다.

(3) 식에서 조파저항이라는 표현을 사용했으나, 현대적 의미로는 잉여저항이라고 간주하여야 한다. 선수 형상계수 f_2 는 비교적 유선

형의 경우에는 0.20 값을, 각이 진 경우에는 0.50 값을 주도록 하였다. 거친 해상상태 보정계수 K 는 1.20 값을 주도록 하였다.

(4) 식에서 공기저항을 계산하기 위한 수선상부 형상계수 f_3 은 일반적인 바지선의 경우 0.60 값을 주도록 하였다.

2.2 해양수산부 고시 방법

“부선의 구조 및 설비 등에 관한 기준”(해양수산부 고시 제 2007-101호)[4] 제 25조 3항을 보면, 바지선에서 예인선에 걸리는 저항을 다음과 같이 구하도록 하였다.

$$R_i = R_f + R_w + R_a \tag{5}$$

단,

R_i : 피예인 선박의 전체 저항(ton)

R_f : 평판마찰저항(ton)

$$R_f = 0.000136F_1 \cdot A_1 \cdot V^2 \tag{6}$$

F_1 : 선체 표면 상태 계수

A_1 : 침수 표면적(m²)

V : 선속(knots)

R_w : 조파저항(ton)

$$R_w = 0.014C \cdot F_2 \cdot A_2 \cdot V^2 \tag{7}$$

C : 거친 해상상태 보정계수

F_2 : 선수 형상계수

A_2 : 수면하 선체 횡단면적(m²)

V : 선속(knots)

R_a : 공기저항(ton)

$$R_a = 0.0000195C_s \cdot C_H \cdot A_3 \cdot (V_W + V)^2 \tag{8}$$

C_s : 수선상부 형상계수

C_H : 바람면적중심 높이계수

A_3 : 수선 상부 횡단면적(m²)

V : 선속(knots)

V_W : 풍속(knots)

(6) 식에서 평판마찰저항을 계산하기 위한 선체표면 상태계수 F_1 은 0.80 값을 주도록 하였다.

(7) 식에서도 조파저항이라는 표현을 사용했으나, 현대적 의미로는 잉여저항이라고 간주하여야 한다. 거친 해상상태 보정계수 C 는 1.20 값을 주도록 하였다. 선수 형상계수 F_2 는 선수형상에 따라 0.40에서 1.00 사이의 값을 주도록 하였다.

(8) 식에서 공기저항을 계산하기 위한 수선상부 형상계수 C_s 은 바람에 면한 선체 형상에 따라 0.40에서 1.50 사이의 값을 주도록 하였다. 바람면적중심 높이계수 C_H 는 수면으로부터 면적 중심 높이에 따라 달라지는데, 1.0~15.3 m에서는 1.00, 106.5~122.0 m에

서는 1.52, 256 m 이상에서는 1.80 등의 값으로 되어 있으므로, 일반적인 바지선에서는 1.00 값을 주면 될 것으로 판단된다.

참고로, 이 방법의 내용은 2009년 3월 19일 고시된 해양수산부 고시부터는 삭제되었다.

2.3 Froude의 평판마찰식 방법

현대적인 모형선 예인시험을 최초로 수행한 William Froude는 지금으로부터 약 140 년전인 1874년 다음과 같은 마찰저항 식을 발표하였다[7].

$$R_f = B \cdot S \cdot V^4 \quad (9)$$

이 때,

- R_f : 평판마찰저항(Pounds)
- B : 선체 표면 및 길이 상태계수
- S : 침수 표면적(ft²)
- V : 선속(600ft/min)
- A : 선체 표면 및 길이별 계수

(9) 식에서 평판마찰저항을 계산하기 위한 선체 표면 및 길이별 상태계수 B 는 길이 2ft의 경우에는 페인트에서는 0.41, 가는 모래는 0.81, 굵은 모래는 1.10으로 발표하였다. 이와 같이 William Froude는 2ft 외에 8ft, 20ft, 50ft에 대해 각각의 값을 주었으나, 그보다 큰 경우에 대해서는 실험을 하지 않았다. 이 식에서 선속 단위를 600 ft/min 대신 ft/s를 사용할 경우, B 에 대한 값은 0.41과 0.81과 1.10 대신 각각 0.0041과 0.0081과 0.0110으로 주어진다.

이 식은 모형선에 해당하는 길이에서의 저항계수이고, William Froude가 그 후에 발표하였던 실선 길이에서의 계수는 고려하지도 않은 것이다.

2.4 기존 방법의 비교

본 논문에서는 공기저항 등의 부가저항은 제외한 평판마찰저항과 잉여저항만으로 구성된 선체 저항만을 기준으로 비교하였다.

2.4.1 평판 마찰저항식 비교

상기 평판마찰저항 추정 방법에 있어서, 미국해군 매뉴얼(식 2), 해양수산부 고시(식 6), 1984 Froude(식 9)를 비교해 보면 다음과 같다.

미국해군 매뉴얼	$R_f = f_1 \cdot S \cdot (V/6)^2$
해양수산부 고시	$R_f = 0.000136F_1 \cdot A_1 \cdot V^2$
1984 Froude	$R_f = B \cdot S \cdot V^4$

(2) 식에서 Pounds와 ton의 환산비 0.0004536로부터 ft²와 m²의 환산비 0.0929를 나누고 6²인 36을 나누면, (6) 식의 0.000136 이 계산된다.

(2) 식에서 f_1 을 최소값 0.45로 보고, knots와 ft/s의 환산비 1.687²인 2.846을 나누고 6²인 36을 나누면, 0.00439 로 계산되므로, (9) 식의 값과 거의 동일한 값을 보여주게 된다.

따라서, 평판마찰 추정 방법에 있어서, 미국 해군 매뉴얼, 해양수산부 고시, Froude 방법은 모두 같은 값을 보여줌을 알 수 있다.

2.4.2 잉여저항식 비교

상기 조파저항이라 표현한 잉여저항 추정 방법에 있어서, 미국 해군 매뉴얼(식 3), 해양수산부 고시(식 7)을 비교해 보면 다음과 같다.

미국해군 매뉴얼	$G = 2.85B \cdot f_2 \cdot V^2 \cdot K$
해양수산부 고시	$R_w = 0.014C \cdot F_2 \cdot A_2 \cdot V^2$

(3) 식에서 Pounds와 ton의 환산비 0.0004536로부터 ft²와 m²의 환산비 0.0929를 나누고 계수 2.85를 곱하면, 0.0139로 계산되므로, 이 두 식 또한 동일하다고 볼 수 있다.

3. 새로운 바지선 저항 추정 방법

3.1 기존 방법의 문제점

William Froude가 1874년 평판 마찰저항을 발표한지 11년 후, 1883년에 O. Reynolds가 파이프 내의 유체흐름을 통해 마찰저항의 상사법칙을 처음 밝혔으나, 1900년대 초까지만 하더라도 Froude의 마찰저항 값을 사용하였다. 그러나 배의 길이가 커지면서 평판시험을 수행할 수 없는 길이의 배에 대해서 문제가 생기기 시작하였다. E. V. Telfer는 1927년부터 Froude 수에 맞는 모형시험 결과에 Reynolds 수에 따른 마찰저항을 더해주는 방법을 제시함으로써 모형시험 결과 해석에 새 장을 열어주었다. 그 후, 평판 마찰저항 식은 많은 연구를 거쳐 1957년 ITTC 모형선-실선 상관계수라는 이름으로 식 (11)이 발표되어 현재는 거의 대부분 이 식을 사용하고 있다. 평판마찰저항을 구하는 식은 다음과 같다.

$$R_f = \frac{1}{2} \rho S V^2 \cdot C_f \quad (10)$$

단,

- ρ : 해수 밀도(kg/m³)
- S : 침수표면적(m²)
- V : 선속(m/s)
- C_f : 평판마찰저항계수

$$C_f = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (11)$$

단,

- R_n : 레이놀드수
- $R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$

단,

- ν : 해수 동점성계수(m²/s)
- L : 배의 침수 길이(m)

현재 널리 사용되고 있는 식 (10), (11)과 기존 바지선 저항 추정에서 사용되는 평판마찰저항 식 (2), (6), (9)를 비교해 보면, (2), (6), (9)

식은 선체표면의 상태를 나타내는 계수와 침수표면적과 선속만 사용할 뿐 레이놀드수와 밀도를 사용하지 않음을 볼 수 있다. 레이놀드수를 사용하지 않는다는 것은 곧 동점성계수와 선체 침수길이를 사용하지 않는다는 것이다. 따라서 이는 현대적인 저항성분 분류의 개념에 따르면 사용할 수 없는 방법이라 판단된다.

또한, 기존 바지선 저항 추정에 사용되는 잉여저항 추정식 (3), (7)을 보면, 선수 형상에 따른 계수만을 사용할 뿐, 배의 길이는 물론 방형비척계수 등 선박의 주요 제원을 사용하지 않았음을 볼 때, 다양한 제원의 바지선에는 적용할 수 없는 방법이라 판단된다.

3.2 새로운 방법의 제시

사고 바지선의 저항성능을 추정하기 위해 Yamagata 도표를 Takashiro가 일부 수정한 것[5]을 조금 더 보완하였다[3].

당초 Yamagata의 도표에서 방형비척계수 C_B 는 0.40으로부터 0.80 까지의 자료가 포함 되어 있었으나, Takashiro가 C_B 를 0.86 까지 확장하였다. 본 논문에서는 이를 또 다시 0.95까지 확장하여 사용하도록 하였다. 이는 한국해양과학기술원에서 수행한 모형시험 결과의 일부 자료를 활용하여 만든 것이다. 선속 범위는 Froude 수 F_n 값으로 볼 때, C_B 0.8 이상에서는 0.20까지, C_B 0.72 이상에서는 0.30까지, 그 이하의 C_B 에서는 0.42까지의 값이 들어있는데, 그 이상의 범위에서도 사용이 가능하다고 판단된다.

평판마찰저항은 1957년 ITTC 모형선-실선 상관계수를 사용하였고, 잉여저항은 다음과 같이 추정한다.

$$R_R = \frac{1}{2} \rho V^{2/3} V^2 \cdot r_R \tag{12}$$

이 때,

- R_R : 잉여저항계수
- ρ : 해수 밀도(kg/m³)
- ∇ : 배수량(m³)
- V : 선속(m/s)
- r_R : 잉여저항계수

$$r_R = k_P \{ r_{R0} + (\Delta r_R)_{B/L} + (\Delta r_R)_{B/d} \} \tag{13}$$

이 때,

- k_P : 단축 쌍축 영향계수
- r_{R0} : 표준선 잉여저항계수
- $(\Delta r_R)_{B/L}$: 선폭-선장비 수정계수
- $(\Delta r_R)_{B/d}$: 선폭-흘수비 수정계수

표준선 잉여저항계수 r_{R0} , 선폭-길이 수정계수 $(\Delta r_R)_{B/L}$, 선폭-흘수 수정계수 $(\Delta r_R)_{B/d}$ 에 대한 각각의 도표는 Fig. 1과 같다.

본 방법은 선속 V 및 방형비척계수 C_B 에 따른 표준선 잉여저항계수는 물론, 선폭-선장비 B/L 과 선폭-흘수비 B/d 에 대한 보정도 함께 해 주므로, 선폭/선장 비가 특별히 크고 선폭/흘수 비가 특별히 작은, 바지선의 저항 추정에 적절할 것으로 판단된다.

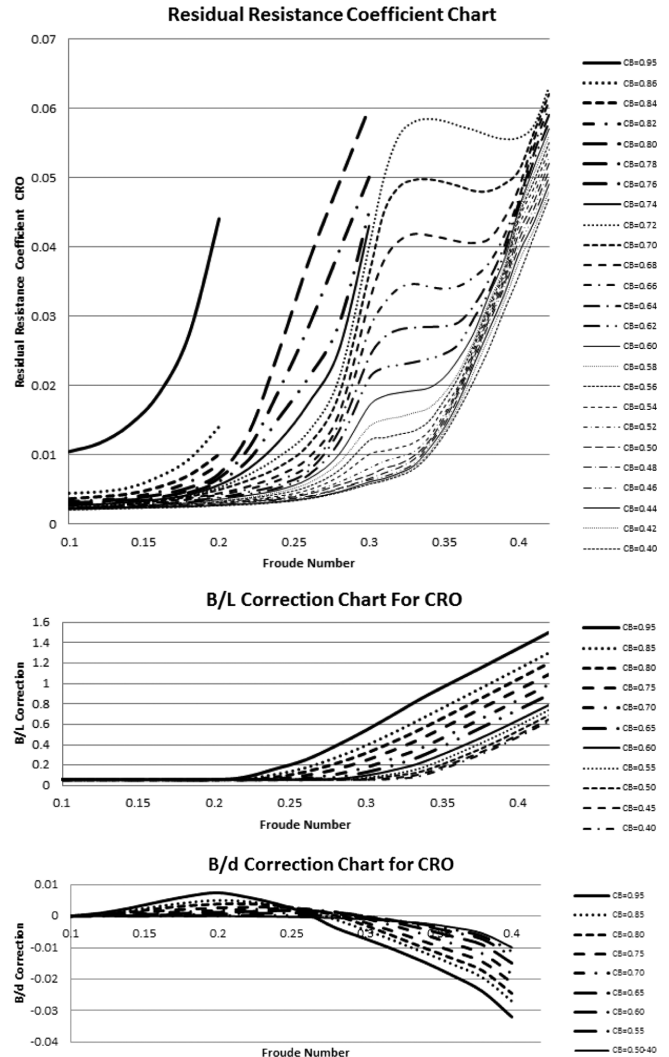


Fig. 1. Modified Yamagata-Barge Chart.

4. 저항성능 추정 결과 비교

바지선 저항성능에 대한 추정 결과를 비교하기 위해, Table 1과 같은 제원의 바지선 선형에 대해 Modified-Yamagata-Barge 도표와 미국 해군 방법의 계산 결과를 Fig. 2-3과 같이 비교하였다. 이 선형은 “부선의 구조 및 설비 등에 관한 기준”[4]의 예제 계산을 위해 실린 선박이다. 이는 공기저항 등의 부가저항은 제외한 평판마찰저항과 잉여저항 만으로 구성된 선체 저항만을 기준으로 비교하였다.

Table 1. Principal Dimensions of a Barge Ship

Hull Form	Barge
Lpp (m)	83.000
B (m)	28.000
d (m)	2.500
C_B	0.9500

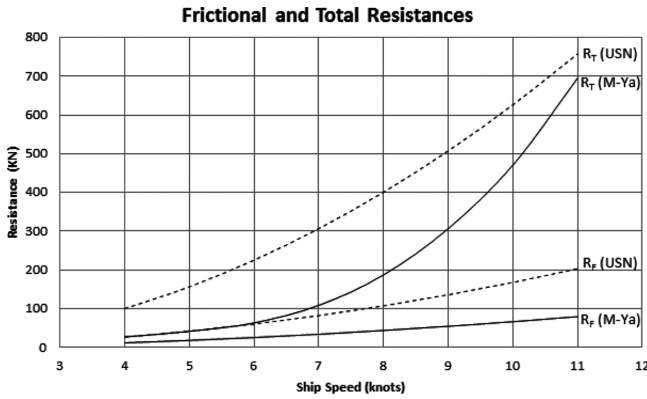


Fig. 2. Comparison of Frictional and Total Resistances for a Barge.

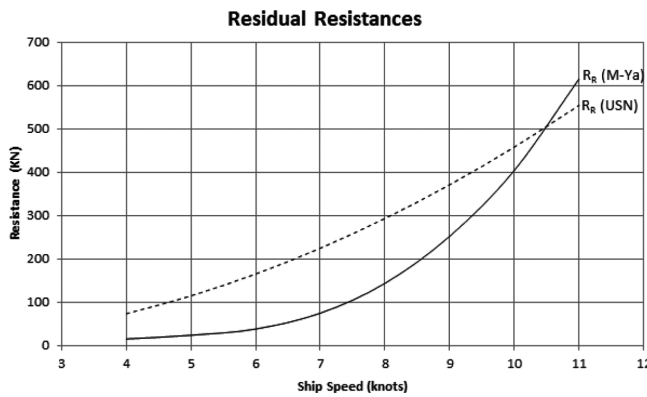


Fig. 3. Comparison of Frictional and Total Resistances for a Barge.

Fig. 2에서 미국 해군 방법과 Modified Yamagata-Barge 방법에 의한 전저항 계산 결과를 비교하고 있는데, 큰 차이를 보여주고 있다.

마찰저항은 전체 선속 범위에서 미국 해군 방법이 모두 큰 값을 보이고 있으며, 잉여저항은 Fig. 3과 같이 미국 해군 방법이 저속에서는 크게 나타났으나, 고속으로 가면서 점점 비슷한 값을 보이다가 10.5 노트 부근부터는 반대로 작은 값을 보이고 있다.

각각의 저항 성분에 대한 정확성을 검토하기 위해, 저항 값을 저항계수로 환산하여 표시하면 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 보면, 미국 해군 방법은 전체 선속 범위에서 잉여저항 계수가 동일하고, 마찰저항 계수도 동일한 것으로 나타난다. 이는 선박의 저항 이론과는 상치되는 것이다. 평균 마찰저항은 레이놀드 수가 증가함에 따라 조금씩 감소해야 하는 것은 당연한 것이다. 또한 잉여저항 계수도 프루우드 수가 증가함에 따라 매우 크게 증가하여야 하므로, 이 또한 선박의 저항 이론과는 상치되는 것이다.

바지선의 예인 저항을 추정함에 있어서, 평균마찰저항에 대하여 미국 해군 매뉴얼의 방법과 1957년 ITTC 모형선-실선 상관관계수 방법을 비교해 볼 때, 전체 선속 범위에서 미국 해군 방법이 매우 큰 저항 값을 보여주게 된다. 미국 해군 방법은 선체표면의 상태를 나타내는 계수와 침수표면적과 선속만 사용할 뿐 레이놀드수와 밀도를 사용하지 않음을 볼 수 있는데, 레이놀드수를 사용하지 않는다는

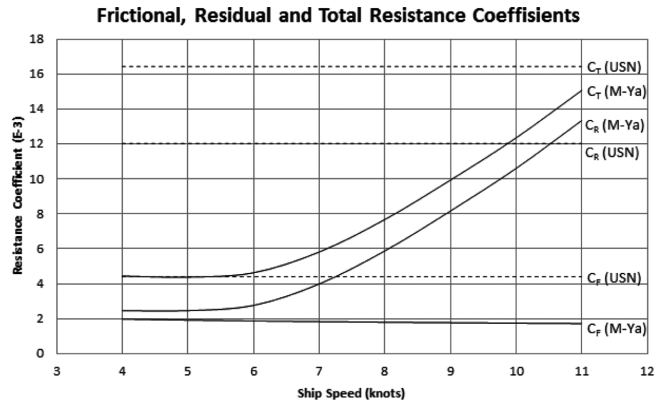


Fig. 4. Comparison of Frictional Residual and Total Resistance Coefficients for a Barge.

것은 곧 동점성계수와 선체 침수길이를 사용하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 미국 해군 방법은 불합리하고 부정확한 방법이라 판단된다.

잉여저항에 대하여 미국 해군 매뉴얼 방법과 저자들이 개발 제안한 Modified-Yamagata-Barge 방법을 비교해 볼 때, 예인이 이루어지는 선속 범위에서는 미국 해군 방법이 매우 큰 저항 값을 보여 주게 된다. 미국 해군 방법은 선속 형상에 따른 계수만을 사용할 뿐, 배의 길이는 물론 방형비척계수 등 선박의 주요 제원을 사용하지 않으며, 잉여저항 값을 전체 선속 범위에서 동일한 값으로 주는데 기인하는 것으로 불합리하고 부정확한 방법이라 판단된다.

5. 결 론

사고선박의 예인력 계산을 위한 바지선에 대한 선체 저항 성능 추정법 비교 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기존에 널리 사용되는 바지선의 예인 저항 추정 방법을 비교 검토하고, 보다 합리적이고도 정확한 추정 방법을 개발 제안하였다.
- (2) 미국 해군 매뉴얼 방법은 저자들이 제안한 Modified-Yamagata-Barge 방법에 비해 매우 큰 예인 저항 값으로 추정하게 되는데, 일반적인 사용자들은 이러한 과대 추정 값을 안전율의 관점에서 수용하고 있다.
- (3) 사고 선박 예인시, 예인력 추정을 위해서는 보다 합리적인 방법으로 예인 저항을 추정 후, 경험값을 고려한 적절한 안전율의 부여를 통해 정확한 값을 추정하는 것이 바람직하다고 판단 된다.

후 기

이 논문은 2012년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지능형 해양사고 예방 및 구난기술 개발-사고선박 예인지원 요소기술 및 구난체계 개선 연구, PMS2530).

참고문헌

- [1] Herbert Engineering Corp., 2004, Tow Manual V2.00, Herbert Engineering Corp.
- [2] Holtrop, J. and Mennen, G.G.J., 1978, A Statistical Power Prediction Method, International Shipbuilding Progress Vol. 25.
- [3] 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).
- [4] Ministry of Oceans and Fisheries, 2007, Standard of the Structure and Equipments for Barge Ships (Article 25), Notification of Ministry of Oceans and Fisheries 2007-101 (Korean).
- [5] Takashiro, K., 1980, Power Prediction Based on Modified Yamagata Resistance Chart and Newly Introduced Thrust Deduction and Wake Factors, Kansai SNAJ Trans. 177.
- [6] US Navy, 2002, U. S. Navy Towing Manual, SL740-AA-MAN-010.
- [7] William Froude, 1874, Experiments for the Determination of the Frictional Resistance of Water on a Surface under Various Conditions, Report to the Admiralty and British Association for the Advancement of Science.

2013년 7월 16일 원고접수

2013년 7월 31일 심사수정일자

2013년 8월 1일 게재확정일자