

선박의 예인저항 및 예인삭의 장력 계산에 관한 연구

† 남택근 · 정창현* · 정중식**

† 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수, *목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수, **목포해양대학교 국제해사수송과학부 교수

A Study on the Calculation of Resistance of the Ship to be Towed and Towline Tension

† Taek-Kun Nam · Chang-Hyun Jung* · Jung Sik Jeong**

† Division of Marine Engineering, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

*Division of Maritime Transportation System, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**Division of International Maritime Transportation Science, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 논문에서는 선박의 예인 시 소요되는 예인마력을 추정하기 위한 예인저항과 예인삭에 걸리는 장력의 계산방법에 대해 언급하고 있다. 선박이 사고 등으로 인해 자력 운항이 불가할 경우 사고선박을 사고 장소로부터 안전한 곳으로 이동시켜야 하고, 이러한 작업을 수행하기 위해서는 선박을 예인하기 위한 예인선의 예인마력을 추정하여야 한다. 본 연구에서는 예인에 따라 발생하는 저항 성분을 바탕으로 예인저항을 추정하였고, 사용된 예인삭의 종류에 따른 부가저항과 예인삭의 중량에 비례하는 수직성분을 이용하여 예인삭에 걸리는 전체장력을 계산하였다. 아울러 예인삭의 부가저항 계산과정에서는 다양한 예인력에 대해 적용할 수 있도록 다항식맞춤법을 응용하였다. 최종적으로는 도출된 예인저항과 예인삭 장력을 계산할 수 있는 UI를 개발하여 계산에 필요한 각 항목을 손쉽게 입력하여 계산할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : 선박, 예인 저항, 예인삭, 장력 계산, 사용자 인터페이스

Abstract : In this paper, calculation methods of resistance of the ship to be towed and towline tension are discussed. When the vessel is fallen into dead ship condition then appropriate towing force have to be estimated to move the vessel from accident place to safe area. In this research, resistance of the ship to be towed and the tow hawser were considered to estimate total towline tension. Polynomial interpolation method is also applied to estimate additional hydrodynamic resistance of towline. Finally, UI program to calculate the resistance and total towline tension is developed. The developed program based on the research results is effective and convenient to use.

Key words : ship, resistance to be towed, towline, tension calculation, UI(user interface)

1. 서 론

본 연구는 예인선을 이용하여 선박을 예인할 때 필요한 소요마력과 예인삭에 걸리는 장력을 계산하는 방법에 대해 언급하고 있다. 선박이 주기고장, 좌초 등 다양한 사고로 인해 자력운항이 불가할 경우 선박을 사고 장소로부터 안전한 곳으로 이동시켜 2차적인 사고를 미연에 방지할 수 있도록 해야 한다. 이러한 예인작업을 수행하기 위해서는 선박의 예인에 필요한 예인선의 예인마력을 추정하여야 하고, 더불어 예인삭에 걸리는 전체 장력을 계산하여야 한다. 이러한 계산은 시간을 다투는 현장의 상황을 반영하여 신속하게 이루어져야 하며, 가능한 정확한 값이 추정되어야 한다.

선박의 예인에 필요한 소요마력계산과 장력계산에 관한 기존의 연구를 살펴보면, 선박의 마찰저항, 조파저항, 공기저항,

기타 부가저항을 고려하여 선박의 소요 예인 마력을 추정하고 있으며(한국선급, 2008), 선체의 기본저항 이외에 바람, 표류력, 선체표면거칠기, 선체파손, 파랑, 천수효과 등에 의한 영향을 고려하여 예인저항을 도출하고 있다(최, 2012). 한국선급의 경우 계산과정은 간단하나 프로펠러 고착으로 인한 영향 및 예인삭에 발생하는 장력에 대한 계산은 이루어지지 않고 있다. 한편 최 등의 경우는 다양한 부가저항 성분을 고려하여 면밀하게 예인저항을 도출하고 있으나 계산과정이 복잡하여 적용이 어려우며 사용자의 편리성을 고려한 UI 및 전체적인 예인장력에 대해서는 연구가 되어 있지 않다.

본 연구에서는 선박의 예인 시 발생하는 저항성분을 계산하고 계산된 예인저항과 사용하는 예인삭에 걸리는 부가저항을 고려하여 최종적인 장력을 계산하였다. 아울러 부가저항 추정 시 다항식맞춤법을 적용하였고, 예인속도에 도달하기 위

† 교신저자 : 중신희원, tknam@mmu.ac.kr 061)240-7225

* 중신희원 hyon@mmu.ac.kr 061)240-7182,

** 중신희원 jsjeong@mmu.ac.kr 061)240-7173

한 예인력과 거리와의 관계를 살펴보았으며 이러한 계산절차를 손쉽게 적용할 수 있도록 UI를 개발하여 예인저항과 장력을 계산할 수 있도록 하였다.

2. 예인 저항 및 장력 계산

2.1 예인 저항 계산

자력운항이 불가능한 선박을 예인하기 위해서는 예인에 필요한 예인선의 소요마력을 산정하여야 하고 이러한 예인력을 산정하기 위해 본 연구에서는 저항 성분으로부터 필요한 예인마력을 추정하고 있다. 대상으로 한 저항성분은 마찰저항, 풍압저항, 조파저항과 프로펠러 고착에 따른 저항이다.

(가) 마찰저항(R_f)

마찰저항은

$$R_f = \rho \lambda S v^{1.83} \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 ρ 는 해수비중, λ 는 마찰계수, $S = 1.7Ld + \nabla/d$ 는 선박침수면적(m^2)이며, ∇, L, d, v 는 각각 배수용적(m^3), 선박의 길이, 평균흘수, 예인속력(m/s)을 의미한다(대한조선학회, 2009). 평판의 마찰저항을 나타내는 마찰계수는 Le Besnerais가 제안한 $\lambda = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L}$ 을 이용하여 결정한다. 한편, 침수면적 S 를 계산할 때 평균흘수와 배수용적을 고려함으로써 화물 뿐만 아니라 연료유와 평형수의 변화에 따른 저항의 변화를 예측할 수 있다.

(나) 풍압저항(R_a)

풍압저항은

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a v_a^2 (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있고, ρ_a 는 공기밀도($0.125 \text{ kg sec}^2/m^4$)를 의미하고, C_a, v_a, A, B, θ 는 각각 풍압계수, 상대풍속(m/sec), 수선 위 정면투영면적(m^2), 수선 위 측면 투영면적(m^2), 바람의 입사각을 의미한다(中島, 1980). 여기에서 풍압계수는 바람의 입사각에 의해 결정되는 값($-0.8 \sim 1.0$)이다(OCIMF, 2008).

(다) 조파저항(R_w)

조파저항은

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w B d v^2 \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있고, ρ_w 는 해수밀도($104.5 \text{ kg sec}^2/m^4$), C_w, B, d, v 는 각각 유압계수, 선폭, 흘수, 선박의 속력을 나타낸다.

(라) 프로펠러 고착저항(R_p)

프로펠러가 회전하지 않고 고착될 경우에 해당되는 저항으로 미국 해군 예인 매뉴얼에 의한 방법을 적용하였다(U.S. Navy, 2002). 고착저항은

$$R_p = 69.06 \frac{\pi}{4} D_p^2 a_p v^2 \quad (4)$$

로 표현가능하며, 원식에 대해 SI단위계로 환산하였으며 프로펠러 날개는 원형 형태로 가정하였다. (4)식에서 D_p 는 프로펠러 직경, a_p 는 프로펠러의 투영면적과 전 원면적의 비율을 나타내는 투영면적비(PAR, projected area ratio)이다. 프로펠러 고착에 따른 저항을 계산하기 위해서는 프로펠러직경에 대한 정보가 필요하지만, 본 연구에서는 선박용 엔진의 출력과 회전수(RPM)로부터 직경을 계산하는 방식을 적용하였다(길, 2007).

엔진의 사양을 바탕으로 한 선박 프로펠러 직경(D_p)은

$$D_p = \kappa D_0 \quad (5)$$

로 계산할 수 있다. 단, $D_0 = [\frac{H}{(0.01 \times R)^3}]^{0.2}$, H 와 R 은 엔진의 연속최대출력과 그 때의 회전수를 의미한다. κ 는 수정계수로서 프로펠러 날개 개수와 선종에 따라 $0.9 \sim 1.02$ 의 값을 취하게 된다. 따라서 선박의 전체적인 예인저항을 R_T 라고 하면, 식(1)~식(5)로부터

$$R_T = R_f + R_a + R_w + R_p \quad (6)$$

을 얻을 수 있다.

2.2 예인 장력 계산

2.1 절에서는 피예인선의 저항을 기준으로 하여 예인에 필요한 저항력을 계산하였고, 추정된 저항력과 사용된 예인삭에 의한 부가저항을 고려하여 예인삭에 걸리는 전체적인 장력 계산이 필요하다. Fig. 1은 예인선과 피예인선 그리고 예인삭 간의 장력 관계를 나타내고 있다.

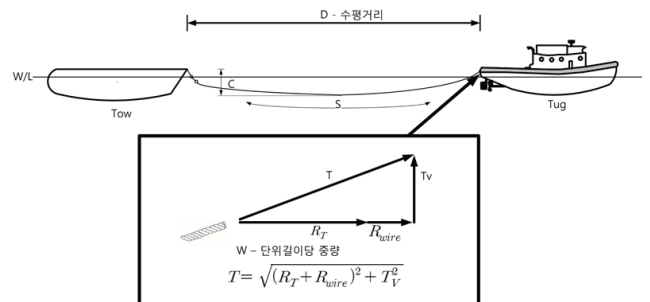


Fig. 1 Towline forces of towing

그림과 같이 예인선과 피예인선이 직선거리 D , 길이가 S 인

Table 1 Hydrodynamic resistance of towline

와이어 직경 (in)	와이어 길이 (ft)	예인저항											
		10,000lb			20,000lb			40,000lb			60,000lb		
		예인속력 및 부가저항											
4kts	8kts	12kts	4kts	8kts	12kts	4kts	8kts	12kts	4kts	8kts	12kts		
1 5/8	2000	900	3500	4100	700	2500	3300	500	2000	3300	250	1000	2500
2	2000	2000	2200	6000	1500	2200	4000	1000	1700	3500	300	1200	3000
2 1/4	2000	1500	5200	11500	1300	3800	8000	1200	3500	6500	1100	3100	5000

예인삭에 의해 연결되어 있으며 이러한 배치에서 실제 예인삭에 걸리는 장력은 다음과 같이 표현할 수 있다(U.S. Navy 2002).

$$T = \sqrt{(R_T + R_{wire})^2 + T_V^2} \quad (7)$$

단, R_T 는 예인저항, R_{wire} 는 예인삭의 부가저항, T_V 는 예인삭장력의 수직성분을 나타낸다.

예인삭의 부가저항(R_{wire})은 Table 1로부터 사용된 와이어의 직경과 길이, 예인장력을 기준으로 하여 도출할 수 있고, 예인삭 장력의 수직성분(T_V)은 사용된 와이어의 직경과 종류로부터 단위 길이 당 중량을 산출한 후 사용된 와이어 길이를 곱해 계산하게 된다. 상기 중량은 와이어가 공기 중에 있을 때를 기준한 값이고, 와이어가 완전히 물에 잠겨 있는 경우 0.87을 공기 중에서의 중량에 곱하여 계산한다. Table 1에서 사용된 와이어는 2 1/4(in)로 와이어에 2 1/4인치 체인스코프(90피트)가 연결되어 있는 상태이다.

예인삭의 부가저항(R_{wire})을 구하기 위해서는 와이어의 직경, 예인저항(R_T)값으로 Table 1을 이용하여야 하고, Fig. 2는 와이어직경 2 1/4인치의 경우 예인저항 10,000lb~60,000lb가 가해진 상태에서의 각 속력(4kts, 8kts, 12kts)에 대한 부가저항을 SI단위로 환산하여 나타내고 있다.

하지만, Table 1에서는 제한적인 예인저항(10,000lb, 20,000lb, 40,000lb, 60,000lb), 속력(4kts, 8kts, 12kts)에 대한 부가저항값만을 알 수 있다. 일반적인 예인의 경우 다양한 예인속력, 예인저항에 대해서도 부가저항을 구해야 함으로 이 값을 구하기 위해 Table 1의 값을 바탕으로 한 다항식 맞춤법¹⁾을 적용하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 예인저항, 예인속력 및 부가저항에 대한 데이터에 1차 다항식 맞춤법을 적용하여 다양한 속력구간(4kts~8kts)에 대한 부가저항 결과값을 나타내고 있다.

이 결과값을 구하기 위해서는 두 번의 다항식 맞춤법을 수행한다. 먼저 구하고자 하는 속력범위와 부가저항에 대한 다항식 맞춤법을 실시하여 속력 별 부가저항을 구한다. 다음으

로 구하고자 하는 장력범위와 속력 및 부가저항에 대한 데이터를 입력하여 장력에 대한 부가저항 값을 도출할 수 있다.

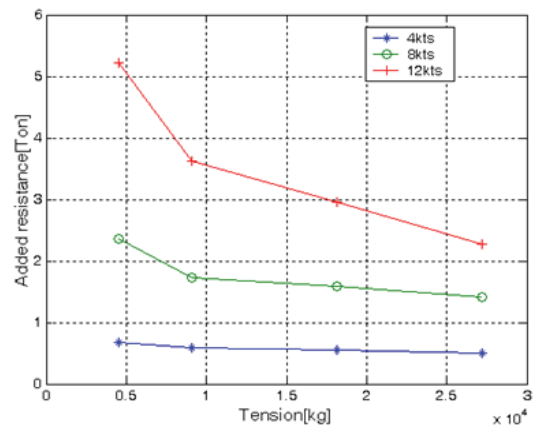


Fig. 2 Relation between resistance and towing tension

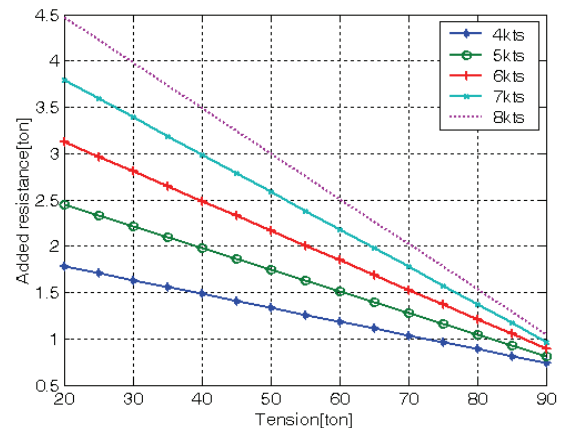


Fig. 3 Added resistance estimation by polynomial fitting

따라서 각종 저항에 의한 (6)식의 예인저항(R_T)과 Fig. 3에서의 부가저항 값을 식(7)에 적용하면 최종적인 예인장력을 계산할 수 있게 된다.

1) n+1개의 데이터가 주어지면 n차의 다항식을 결정할 수 있고, 본 연구에서는 MATLAB의 polyfit 함수를 적용하여 예인저항에 따른 예인삭의 부가저항값을 구하였다.

2.3 예인력과 예인속도 및 거리와의 관계

2.1절의 결과를 이용하면 주어진 조건 하에서 예인에 필요한 예인마력을 추정할 수 있다. 각 식으로부터 소요저항을 계산하는 과정에 목표로 하는 예인속력이 포함되어 있지만 실제로 예인작업을 수행하는 데 있어서는 처음부터 목표로 하는 예인속력에 도달할 수는 없다. 본 절에서는 목적으로 하는 예인속력에 도달하기 위해 필요한 예인력과 거리와의 관계를 살펴보고자 한다. 이를 위해 질점계의 속도와 가속도의 관계식을 이용하면

$$adx = vdv \tag{8}$$

를 얻을 수 있다. 단, x 는 변위, v 는 속력을 의미한다. 식(8)의 양변에 질량 m 을 곱하여 정리하면

$$mvdv = Fdx \tag{9}$$

가 얻어진다. 단, $F=ma$ 는 예인력을 의미한다. (9)식에서 양변을 각각 속도($v_0 \sim v$)와 변위($x_0 \sim x$)로 적분하고, 초기위치로부터의 현재의 변위를 $s = x - x_0$ 로 나타내면

$$\frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2) = Fs \tag{10}$$

가 얻어진다. 식(10)의 F 는 예인에 실질적으로 가해지는 예인력으로 전체예인력(T)과 선체저항(R)의 차로 볼 수 있으므로 예인거리, 예인속력, 예인력과 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$s = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2(T - R)} \tag{11}$$

식 (11)로부터 예인력(T)와 저항(R)에 의해 목표로 하는 예인속력에 도달할 수 있는 거리가 결정되는 것을 알 수 있다. 즉, $T > R$ 의 조건을 만족하면 일정 거리 항주 시 예인속력에 도달할 수 있지만 $T \leq R$ 이 되면 목적으로 하는 예인속력에 도달하기 위해서는 무한대의 거리가 필요하게 된다.

실제로 선체를 예인하는 작업하는 경우 선체질량(m) = $m_0 + qm'_0$ 로 고려한다(中島利雄, 1980). m_0 는 선체의 질량이고, $m'_0 (\cong 0.07m_0)$ 는 선체부가질량, $q = 1.2$ 는 천수영향계수로 선체의 질량 이외에 부가적인 질량을 고려하는 것은 바람직하다고 판단된다.

3. 실제선박을 대상으로 한 예인장력 계산

제2장에서 살펴본 계산식을 실제 선박에 적용하여 계산 결과의 유용성을 살펴보고자 한다. 대상으로 하는 선박은 2001년 건조된 6,250TEU 컨테이너 선박이고 선박 데이터는 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of vessel

구 분	Container ship(6,250TEU)
LOA	300.25 (m)
LBP	286.3 (m)
B	40.3 (m)
D	24.1 (m)
d(full loaded)	14.015 (m)
d(ballast)	4.675 (m)
G/T	73,172 (ton)
DWT	77,946 (ton)
Displacement(full loaded)	104,555 (ton)
Ballast water	7,908 (ton)
Bunker	7,301 (ton)
Fresh water	363 (ton)
Main engine(MCR)	93,120BHP*104rpm
Main engine(NCR)	83,808BHP*100.4rpm

3.1 예인 저항 및 장력 계산

Table 2에 주어진 선박의 데이터를 바탕으로 예인저항과 장력을 계산하였다. 먼저 마찰저항을 구하기 위한 상수값은 $\rho = 1.025$, $\lambda = 0.1392$ 로 하였고, 상대풍속은 $v_a = 4[m/s]$, 풍압계수 $C_a = 0.8$, 유압계수 $C_w = 0.1$, 투영면적비 $a_p = 0.6$ 으로 설정하였고, 만선 상태를 기준으로 저항값을 계산하였다.

마찰계수 λ 의 경우 Le Besnerais의 식을 적용하였고, 풍압계수와 유압계수는 선수형상과 바람의 입사각, 선박의 화물 적재 상태에 따라서 달라지지만 일반적인 선수형상과 방향의 입사각이 선수방향이라는 조건을 적용하였다(OCIMF, 2008). 프로펠러의 투영면적비는 일반적으로 0.3~0.6의 값을 나타내는 데 본 연구에서는 가능한 큰 값을 취하여 프로펠러 고착에 의한 저항력이 전체 예인저항에 미치는 영향을 살펴보았다. 아울러 선수방향으로 예인하는 것으로 가정하여 수선 위 정면 투영면적은 컨테이너의 선형을 고려하여 Fig. 4의 ②+③으로 계산하였다.

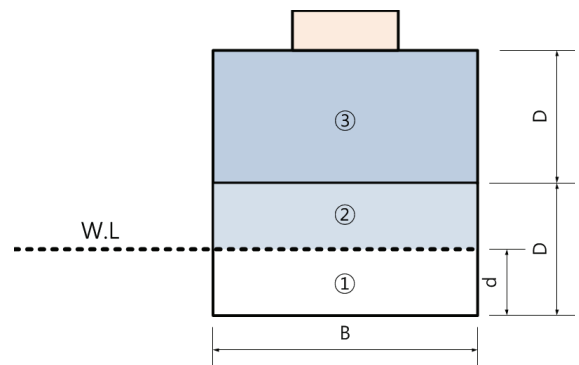


Fig. 4 Projected area of the vessel

아울러 예인저항과 예항 시 예인선 자체의 저항을 전체 저항의 20%로 잡는다면 일반적인 예인선의 블라드풀(bollard pull)은 1.2ton/100BHP 이므로 실제로 필요한 마력은 $R_T/0.012(1-0.2) = 104R_T$ 로 계산하였다. 예인선이 아닌 일반선박으로 예인할 경우에는 1.0ton/100BHP의 블라드풀을 적용하여 소요마력을 $125R_T$ 로 추정한다(川原, 1995).

위에서 살펴본 내용을 바탕으로 Table 2의 선택을 대상으로 하여 예인저항과 장력을 계산하였고 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Calculation results of resistances

예인저항 \ 예인속력	3kt	4kt
R_f [ton]	15.201	25.429
R_a [ton]	1.707	1.707
R_w [ton]	26.557	47.213
R_p [ton]	7.032	12.501
R_T [ton]	50.317	86.850
소요마력(PS)	5,233	9,032
T_V [ton]	4.245	4.245
R_{wire} [ton]	0.915	0.786
T [ton]	51.408	87.747

3노트로 예인할 경우의 예인저항력은 50톤 정도로 추정되고 같은 조건하에서 4노트로 예인할 경우 70%정도가 증가된 87톤의 예인저항이 걸리는 것으로 계산된다. 아울러 예인저항과 예인선의 하중을 고려하여 계산한 부가저항을 살펴보면 3노트와 4노트로 예인할 경우 각각 0.92톤과 0.79톤이 걸리게 된다.

한편, 예인속력에 도달할 수 있는 거리를 살펴보면 (11)식에서 전체저항의 2배에 달하는 예항력으로 만재상태의 선박을 예인할 경우 4 노트에 도달하기 위한 거리는 710m 이고, 3노트에 도달하기 위한 거리는 400m로 계산된다. 단, $\kappa = 1.2$, 저항값은 전체예인저항의 평균치로 하였다.

3.2 예인저항과 예인장력 계산 UI

예인저항과 예인장력의 계산을 손쉽게 할 수 있도록 GUI(graphical user interface) 프로그램을 개발하였고 디스플레이 화면은 Fig. 5~Fig. 6과 같다.

예인저항과 부가저항을 고려한 장력계산이 가능하도록 메뉴를 구성하였으며 각 파라미터 값을 선택 혹은 직접 입력하여 최종적인 계산 결과값을 손쉽게 얻을 수 있도록 하였다.

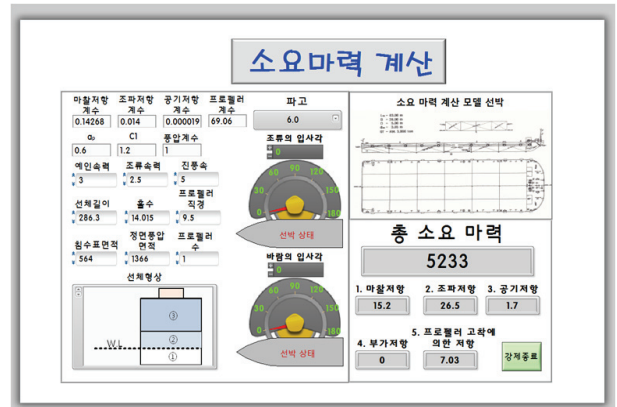


Fig. 5 GUI of towing resistance calculation

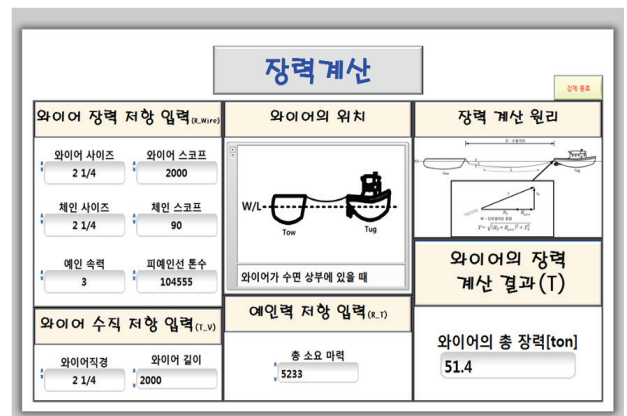


Fig. 6 GUI of towline tension calculation

4. 결 론

본 연구에서는 자력운항이 불가능한 선박을 안전한 장소로 예인하기 위해 필요한 예인선의 소요마력과 예인선에 걸리는 정적인 장력계산방법에 대해 고찰하였다.

먼저 예인저항을 계산하기 위해 마찰저항, 풍압저항, 조파저항 및 프로펠러고착 저항을 고려하였고, 프로펠러 직경을 산출하기 위해 엔진의 연속최대출력과 회전수를 이용하는 방법을 적용하였다.

다음으로 도출된 예인저항(=예인력)과 예인선의 부가저항 및 하중에 의한 영향을 고려하여 장력을 계산하였다. 부가저항의 계산은 미국해군 예인매뉴얼의 실험적인 데이터를 바탕으로 하였고, 다항식 맞춤법을 적용하여 다양한 속력과 예인력에 대한 부가저항을 산출할 수 있도록 하였다.

아울러 예인력과 저항력을 고려하여 소정의 예인속력에 도달할 수 있는 거리에 대해 검토를 수행하였고, 예인저항과 예인장력 계산에 대한 전체적인 과정을 손쉽게 응용할 수 있도록 GUI환경을 적용한 소요마력계산 프로그램과 장력계산 프로그램을 개발하였다.

본 논문에서 적용한 예인저항 및 장력계산 방법을 실제 컨테이너선박에 응용하였고 계산결과로부터 조파저항, 마찰저항,

프로펠러고착에 의한 저항이 예인저항에 주요한 부분을 차지하고 있는 것을 알 수 있었고, 예인속력이 예인력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

예인력과 예인삭의 부가저항 및 하중에 의한 장력의 경우에는 계산결과 전체적인 예인력의 1%~2%정도에 달하는 값이었지만 예인삭의 종류와 예선방식에 따라 다양한 영향을 미칠 수 있는 주요한 요소라고 생각된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 “지능형 해양구난 핵심기술개발(No. D10811511H360000170)”의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 길병래, 김정렬, 전효중, 조권희, 이돈출(2007), 축계장치와 프로펠러, 대진문화사.
- [2] 대한조선학회 선박유체역학연구회(2009), 선박의 저항과 추진, 지성사.
- [3] 정창현 외 2명(2012), 국내 구난활동 사례분석을 통한 개선 방향에 관한 연구, 한국항해항만학회 춘계공동학술대회 논문집, pp. 47-49.
- [4] 최혁진, 김은찬(2012), 손상선박의 예인력 추정을 위한 선박저항 계산 프로그램, 한국해양환경공학회지, 제15권, 제2호. pp. 150-155.
- [5] 한국선급, 선박안전기술공단(2008), 대형 예·부선의 안전관리 강화 방안 연구 용역, 국토해양부.
- [6] 中島利雄(1980), 曳船操船, 海文堂
- [7] 川原泰正、豊村誠二(1995), 海難の處置と応急マニュアル, (株)成山堂書店
- [8] U.S.Navy Towing Manual(2002), U.S.Naval Sea Systems Command.
- [9] OCIMF(2008), Mooring Equipment Guidelines, 3rd Edition.

원고접수일 : 2012년 8월 10일

심사완료일 : 2012년 9월 20일

원고채택일 : 2012년 9월 21일