실선 예항시험을 통한 예인선의 소요마력 산출에 관한 연구

정창현^{*†} · 남택근^{**} · 최혁진^{***}

*, ** Mokpo National Maritime University, *** 한국해양과학기술원

A Study on the Necessary Thrust of Tugs through the Ship's Towing Test

Chang-Hyun Jung^{*†} · Taek-Kun Nam^{**} · Hyuek-Jin Choi^{***}

*, ** Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

*** Korea Institute of Ocean Science & Technology, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 사고선박의 2차적인 피해를 줄이기 위해서는 사고선박을 안전한 곳으로 이동시키기 위한 예인선의 소요마력 산출이 요구되며, 길이 93 m 여객선형 대상선박에 대한 실선실험을 통하여 소요마력 산출에 대한 이론적인 계산식의 유효성을 검증하였다. 실선실험 결과는 이론계산 결과와 비교해 볼 때 상당히 일치되어 예선의 소요마력 산정을 위해 사용하기에 충분하다고 판단되며, 정적저항에서 공기저항, 마찰저항, 잉여저항과 더불어 프로펠러 고착저항이 상대적으로 큰 값으로 평가되었다. 피예인선은 예인과정에서 좌우 측면으로 30° 정도까지 스윙운동 및 요우잉이 발생하였으며, 이로 인한 동적저항이 큰 값으로 평가되었다. 추후 안전율에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 저항의 정확한 예측을 통하여 안전율을 최소화함으로써 경제적인 예인선의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 소요마력, 실선실험, 이론계산, 정적저항, 동적저항, 안전율

Abstract : It needed the calculation of the required tugboat's power to move the damaged vessel to the safe area for reducing the additional damages. In this paper, it was verified the theoretical calculation method on the required power of tugboat through the 93m real ship tests. From the experiments, it was considered that the theoretical calculation method was sufficient to estimate the required power of tugboat. The resistance of the locked propeller was relatively big portions compared with other static resistances such as air resistance, frictional resistance and residual resistance. And dynamic resistance induced by swing movement and yawing was continuously occurred and it also was great effects on the total resistance. In the future, the safety factor will be considered and the exact prediction of ship's resistance will enhance the efficiency of tugboat because of the minimization of safety factor.

Key Words : Required tugboat's power, Real ship tests, Theoretical calculation method, Static resistance, Dynamic resistance, Safety factor

1. 서 론

해양사고 예방을 위해 국제해사기구(IMO)를 중심으로 각 국가에서는 많은 노력을 하고 있음에도 불구하고 선박에 의한 대형 오염사고와 인명사고 등 해양사고는 끊이지 않고 발생되고 있다(Choi and Kim, 2012).

대부분 해양사고의 경우에는 현장 기상이 불량하거나, 주변 상황이 좋지 않은 경우가 많으며, 정상적인 부양상태가 아닐 경우에는 다양한 예인방식이 요구된다(Jung et al., 2012).

이러한 사고선박은 2차적인 피해를 줄이기 위해 예인선에 의해 안전한 장소로 이동되지만, 사고선박의 예인이 지연되거

나 잘못된 예인은 사고선박의 침몰이나 예인작의 절단 또는 예인선의 전복 등으로 이어질 수 있다(Nam and Jung, 2013).

예인기술에 대한 연구는 미해군에서 작성한 Towing Manual(US Navy, 2002)과 미국, 영국 등에서 출판된 예인선 운용에 대한 자료(Reid, 2004; Livingstone and Livingstone, 2006)로 극히 제한적이며, 여기서는 군함에 대한 내용으로 한정되거나, 구난예인(salvage towing)에 대한 내용이 거의 없는 실정이다.

따라서 신속하고 체계적인 구난을 위해서는 예인기술의 개발이 시급히 요구되는 상황이며, 해상상태와 사고선박의 손상상태 등의 조건이 반영된 예인계획 수립과 기술의 개발이 필요하다.

본 연구의 최종 목표는 Fig. 1에서와 같이 당시의 해상상

† Corresponding Author : hyon@mmu.ac.kr, 061-240-7182

태를 고려하여 부양상태인 사고선박을 안전하게 예인하기 위해 요구되는 예인선의 소요마력과 사고지점에 가장 가까운 예인선을 선정하여 신속히 투입하기 위한 예인지원시스템의 개발에 있으며, 이러한 과정에서 예인선의 소요마력을 산출할 수 있는 이론적인 계산식의 정립이 요구되므로 실선 실험을 통하여 그 유효성을 검증하고자 한다.

Fig. 1. Outline of towing support system.

2. 이론계산

선체에 작용하는 저항은 일반적으로 수면상부의 공기저항과 수면하부의 해수에 의한 저항으로 구분되며, 수면하부의 저항은 Fig. 2에서와 같이 다양한 성분으로 저항을 구분하고 있다(SNAK, 2012).

본 연구에서는 Froude의 가정에 따른 저항성분 분류법에 따라 저항을 계산하였으며, 여기에 미해군 예인 매뉴얼에서 언급하고 있는 프로펠러 고착저항(resistance of the locked propeller)을 추가하였다.

일반적으로 프로펠러가 작동하여 추진력을 얻는 상황에서는 프로펠러에 의한 추력과 효율만을 고려하지만, 프로펠러를 작동하지 않고 예인되는 상황에서는 선체저항뿐만 아니라 프로펠러 부착물에 의한 저항도 함께 고려해야 한다. 미해군 예인 매뉴얼에서 제시하고 있는 프로펠러 고착에 의한 저항은 수면하부에 작용하는 타 저항에 비하여 상당히 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다.

또한, 프로펠러 고착저항과 더불어 공기저항, 마찰저항 그리고 잉여저항 등 정적저항(static resistance; R_{static})은 비교적 정확한 예측이 가능하지만, 예인중에는 피예인선의 요우잉(yawing)이 발생하고 파도(wave)로 인하여 예인선과의 상대적 운동으로 인한 예인선에 걸리는 동적저항(dynamic resistance; $R_{dynamic}$)은 상당히 예측하기 힘든 것으로 알려져 있다(US Navy, 2002).

여기에서는 프로펠러 고착저항을 포함한 정적저항과 요우잉으로 인한 저항증가를 함께 고려하였다.

$$R = R_{Static} + R_{Dynamic} \quad (1)$$

$$R_{Static} = R_a + R_f + R_r + R_p \quad (2)$$

$$R_{Dynamic} = R_{yaw} + R_{wave} \quad (3)$$

Fig. 2. Classification of resistance.

2.1 정적저항

1) 공기저항

공기저항은 식(4)를 사용하였고, 풍압계수는 풍동실험을 통하여 정확한 값을 얻을 수 있으나, 여기에서는 Fujiwara가 제안한 풍압계수를 사용하였다(Fujiwara et al., 1998).

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) V_a^2 \quad (4)$$

R_a : wind pressure(kgf)

ρ_a : density of air($0.125 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^4$)

C_a : wind pressure coefficient

A : front projected area(m^2)

B : lateral projected area(m^2)

θ : relative wind angle

V_a : relative wind velocity(m/s)

2) 마찰저항

마찰저항은 식(5)와 같고, 마찰저항계수는 Reynolds 수 ($R_n = VL/\nu$, ν :coefficient of kinematic viscosity)에 따른 schoenherr 곡선을 이용하였다(SNAK, 2012).

$$R_f = \frac{1}{2} \rho_w C_f S V_w^2 \quad (5)$$

R_f : frictional resistance(kgf)

ρ_w : density of water($104.6 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^4$)

C_f : frictional resistance coefficient

S : wetted surface area(m^2)

V_w : relative tow speed(m/s)

3) 잉여저항

잉여저항은 식(6)과 같고, 잉여저항계수는 주형계수(prismatic coefficient), 선폭과 흘수 비(B/d), Froude number를 고려한 Taylor tank chart를 이용하였다(Taylor, 1954).

$$R_r = \frac{1}{2} \rho_w C_r S V_w^2 \quad (6)$$

R_r : residual resistance(kgf)

C_r : residual resistance coefficient

4) 프로펠러 고착저항

선박추진과 관련하여 프로펠러의 효율에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만, 예인되고 있는 선박의 프로펠러 저항에 대한 연구는 많지 않다. 식(7)은 미해군 예인 매뉴얼에서 사용하고 있는 식으로 일반적인 상황에서 피예인선의 전체 저항 중 가장 큰 저항으로 고려되고 있다(US Navy, 2002).

$$R_p = 3.737 (A_p) (V_{tow})^2 \quad (7)$$

R_p : propeller resistance(pounds)

A_p : projected area of propeller(ft^2)

V_{tow} : relative tow speed(knots)

따라서 본 연구에서도 프로펠러 고착저항을 주요한 저항 성분으로 고려하였다. 상기의 식(7)에서는 길이 단위로 ft, 속력은 knot 그리고 그 결과값을 pounds로 나타내고 있으므로, 이를 SI단위를 사용한 형태로 수정하여 식(8)을 제안하여 적용하였다. 여기에서는 실제적으로 저항을 유발하는 매개체인 해수에 관한 밀도가 적용되었고, 그 결과값이 위에서 언급된 다른 저항값들과 마찬가지로 kgf 단위로 표현된다.

$$R_p = 0.67 \rho_w \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi V_w^2 \quad (8)$$

R_p : propeller resistance(kgf)

D : propeller diameter(m)

2.2 동적저항

1) Yawing

해상에서는 동일한 속력으로 예인을 하더라도 피예인선은 예인선과 일직선인 형태로 똑바로 끌려오지 않고, Fig. 3과 같이 피예인선은 좌우로 스윙하면서 요우잉 현상이 발생되었다.

Fig. 3. Yawing and swing movement.

따라서 정상적인 저항 이외에도 선체가 예인방향에 대하여 일정한 입사각을 갖는 비스듬한 상태로 놓이게 되어 측면의 유압저항을 추가적으로 받게 된다. 유압력은 식(9)와 같고, 유압계수(Yoon, 2002)는 피예인선이 측면으로 최대로 치우친 상태로 입사각 30도에서의 값을 적용하였다.

$$R_y = \frac{1}{2} \rho_w C_y L d V_w^2 \quad (9)$$

R_y : lateral current resistance(kgf)

C_y : lateral current force coefficient

L : length between perpendiculars(m)

d : draft(m)

2) 파도

Fig. 4는 요우잉과 파도에 기인한 동적저항(장력)을 보여주고 있다. 파도에 의한 저항은 예인선과 피예인선의 복잡한 동적 반응에 의해 형성되고, 요우잉과 파도에 기인한 장력이 최대가 되는 순간 최대장력이 된다(US Navy, 2002). 본 연구에서는 실선실험 당시의 파도에 기인한 장력은 근소하다고 판단되어 계산에서 제외하였다.

Fig. 4. Extreme towline tension(US Navy, 2002).

Fig. 5. Preliminary test on the berth.

3. 예항실험

3.1 실험장치

실험장치의 구성은 장력을 계측하는 로드셀 1개, 장력값을 표시 및 저장하는 노트북 1개, 로드셀과 예인삭 및 비트에 연결하는 샤클 2개 그리고 와이어 1개로 구성된다. 로드셀의 사양은 Table 1과 같이 최대 20톤까지 장력 측정이 가능하고, 샤클과 와이어의 파단강도는 40톤이다.

Table 1. Specification of load cell

Model	RCHTC-20T
	Range	0~20 tonf
	Rated output	2.0 mV/V $\pm$ 0.2 %
	Combined error	0.03 %
	Excitation	DC 10V
	Breaking load of shackle & wire	40 tonf

Fig. 5는 예인 실선실험을 수행하기 이전에 대상선박인 목포해양대학교 실습선 새유달호에서 정박중 로드셀 예비실험을 실시한 모습이며, Fig. 6은 1초에 10개의 샘플링으로 설정하여 계측된 장력값을 나타내고 있으며, 실험을 수행하기 위해 본 연구를 통해 개발한 GUI이다. 로드셀, 풍향·풍속계 및 시간 등의 데이터를 디스플레이하고 저장할 수 있도록 프로그래밍하였다.

Fig. 6. Screen of GUI.

3.2 실선실험

대상선박은 Table 2와 같이 목포해양대학교 실습선 새유달호이며, 실선실험은 새유달호의 연안항해 일정에 맞추어 2014년 3월 17일 출항시 실시되었다. 예인선은 Table 3과 같이 국제1호(124톤, 2,800마력, Z-Propeller)가 사용되었으며, 예인삭은 예인선에 설치된 직경 100 mm의 폴리프로필렌 로프(파단강도 90톤)를 사용하였다. 실험장소는 Fig. 7와 같이 목포항 불무기도 인근 묘박지 부근이며, Table 4에서와 같이 풍향/풍속은 남풍 7 m/s이고, 창조류 0.7 m/s, 파고는 0.5 m, 수심 13 m인 조건에서 예인실험이 실시되었다.

로드셀은 Fig. 8 및 Fig. 9에서와 같이 실습선 선수갑판에 설치하였으며, 예인삭은 선수부 정중앙에 위치한 파나마 초크를 통하여 설치되었다.

풍속은 실습선 풍속계를 통하여 계측되었고, 파고는 시각적으로 계측되었으며, 조류는 표류(drifting) 상태에서 실습선 선속계를 통하여 확인하였다. 실험을 실시하기 전에 정박지에 도착하여 투묘 상태로 약 1시간 대기하는 과정에서 유향

실선 예항시험을 통한 예인선의 소요마력 산출에 관한 연구

을 파악할 수 있었으며, 양묘 후에는 약 30분간 표류하여 유속을 확인하였다.

각종 계측값의 정확한 비교를 위하여 출항전에 실습선의 시각과 실험장치의 시각을 동일하게 설정하였으며, 정지상태인 피예인 선박을 이론계산을 수행하고자 하는 2.5m/s 속력까지 예인하여 정상속력 단계에서 3분 이상 계측하였다.

Table 2. Ship's particulars of T.S. SAEYUDAL

Item	Dimensions
LBP	93.0(m)
B	14.5(m)
Draft	5.0(m)
G/T	3,644(ton)
Displacement	4,060(ton)
Block coefficient	0.598
Wetted surface area	1,597(m ²)
Transverse projected area	188(m ²)
Lateral projected area	1,012(m ²)
Propeller diameter	3.06(m)

Table 3. Tugboat's particulars

Item	Dimensions
G/T	124(ton)
Horse power	2,800(hp)
Type of propeller	Z-P
Rope	Polypropylene, 100(mm)

Table 4. Environmental condition and towing speed

Item	Dimensions
Wind velocity & direction	7(m/s), S
Current speed & direction	0.7(m/s), N
Wave height	0.5(m)
Depth	13(m)
Towing speed	2.5(m/s)

Fig. 7. Experimental area of towing.

Fig. 8. Installation of load cell on the bitt.

Fig. 9. Towed by tugboat.

4. 소요마력 추정

선박의 예인중에는 Fig. 3 및 Fig. 9와 같이 피예인선은 지속적으로 좌우로 스윙 및 요우잉을 하는 것으로 확인되었다. 따라서 저항의 계산은 Fig. 10의 A위치(Fig. 9 상황)에서는 풍압저항, 마찰저항, 잉여저항 그리고 프로펠러 고착저항을 고려해야 하고, B위치(Fig. 3 상황)에서는 요우잉 현상으로 인하여 추가적으로 측면에서의 외력에 의한 유압저항을 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 5는 A와 B위치에서의 각 저항값을 계산한 결과를 보여주고 있으며, B위치에서는 A에서와 같이 전진속력으로 인하여 마찰저항, 잉여저항 및 프로펠러 고착저항은 유의한 차이가 없을 것으로 판단되어 저항의 변화를 무시하였다. 하지만, 공기저항은 요우잉 자세로 인한 측면의 수평면적 증가 및 풍압합력계수의 증가로 인하여 2배이상 증가되었고, 타 저항에 비하여 상대적으로 큰 유압저항이 작용하여 총 저항값은 거의 2배로 증가하는 것으로 계산되었다.

Table 5. Results of theoretical calculation

Resis. (kgf)	Wind press.	Fric. resis.	Resi. resis.	Pro. resis.	Lat. current resis.	Total resis.
Posi. A	0.8	1.5	0.5	3.2	0	6.0
Posi. B	2.2	1.5	0.5	3.2	3.6	11.0

Fig. 10. Resistance increase by yawing and swing movement.

Fig. 11은 실선실험 결과를 보여주고 있다. 예인 초기 오후 1시 37분 무렵에 최대장력인 19톤이 측정되었는데, 이는 정지상태인 피예인선의 속력을 높이는 과정에서 순간최대장력이 작용한 것으로 판단되고, 점차 속력이 증가하여 2.5m/s

의 일정한 예인속력이 유지된 점선으로 표시된 구역에서는 6.5톤에서 10.5톤 사이의 장력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 오후 1시 45분 무렵에는 장력이 급격히 작아진 구간이 발생하였는데, 이는 예인선이 순간 예인을 중단하였기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 실험결과를 Table 5에서 계산된 이론계산 결과와 비교해 볼 때 상당히 일치됨을 알 수 있다. 물론 해상에서의 외력환경 및 선체거동에 대한 값을 정확하게 계측하여 이론계산에 적용하기에는 다소 어려움이 있겠지만, 앞서 제시한 이론계산 방법은 예선의 소요마력 산정을 위해 사용하기에 충분하다고 판단된다.

Fig. 11. Results of towing experiment.

또한, 사고선박을 예인하기 위한 소요마력 산정에서 상기의 이론계산 결과에 추가하여 파도에 의한 예인선과 피예인선간의 동적운동 및 예기치 못한 상황을 고려하여 식(10)과 같이 일정한 안전율(safety factor)을 고려하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

$$R_T = R \times S.F \quad (10)$$

이와 같이 최종적으로 얻어진 총 저항을 바탕으로 예인선의 소요마력은 식(11)과 같이 계산되며, Table 6에서와 같이 예인선은 형태에 따라 조종성능뿐만 아니라 Bollard Pull(유효마력)이 달라지므로 상황에 따른 적합한 예인선이 선정되어야 한다.

$$Required\ Power = R_T \times \frac{100}{BH} \quad (11)$$

Table 6. Relationship between brake horsepower and bollard pull for different propulsion systems(Hensen, 2003)

Type of propulsion	Break horsepower in tons/100bhp(BH)
Voith propeller	1.15
Open fixed pitch propeller	1.3
Azimuth propeller in nozzle	1.35
FPP/CPP in nozzle (conventional tugs)	1.5

5. 결 론

사고선박의 2차적인 피해를 줄이기 위해서는 사고선박을 안전한 곳으로 이동시키기 위한 예인선의 소요마력 산출이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 실선실험을 통하여 소요마력 산출에 대한 이론적인 계산식의 유효성을 검증하였다.

첫째, 실선실험 결과는 이론계산 결과와 비교해 볼 때 상당히 일치되어 예선의 소요마력 산정을 위해 사용하기에 충분하다고 판단된다.

둘째, 정적저항에서 공기저항, 마찰저항, 잉여저항에 추가적으로 프로펠러 고착저항이 상대적으로 큰 값으로 평가되었다.

셋째, 피예인선은 예인과정에서 좌우 측면으로 30°정도까지 스윙운동 및 요우잉이 발생하였으며, 이로 인하여 동적저항이 큰 값으로 평가되었다.

넷째, 사고선박을 예인하기 위한 소요마력 산정에서 과도에 의한 예인선과 피예인선의 동적운동 및 예기치 못한 상황을 고려하여 일정한 안전율을 고려하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 정지상태인 피예인선의 속력을 높이는 과정에서 순간최대장력이 작용할 수 있으므로 속력은 점진적으로 천천히 올려야 할 것으로 판단된다.

추후 피예인선의 동적운동을 최소화시키는 방안과 안전율에 대한 연구가 후속연구로써 필요할 것으로 판단되며, 저항의 정확한 예측을 통하여 안전율을 최소화함으로써 경제적인 예인선의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 소관 연구개발사업 “지능형 해양사고 예방 및 구난 기술 개발 - 사고선박 예인지원 요소기술 및 구난체계 개선 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Choi, H. J. and E. C. Kim(2012), “Development of Ship Resistance Calculation Program for Prediction of Towing Forces for Damaged Ships”, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 150-155.
- [2] Fujiwara, T., M. Ueno and T. Nimura(1998), “Estimation of Wind Forces and Moments acting on Ships”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 183, pp. 77-90.
- [3] Hensen, H.(2003), “Tug Use in Port”, The Nautical Institute, pp. 29-31.
- [4] Jung, C. H., T. K. Nam and J. S. Jeong(2012), “A Study on the Improvement of Salvage Procedures through the Collision Accident of Ships”, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 10, pp. 851-856.
- [5] Livingstone, G. H. and G. H. Livingstone(2006), “Tug Use Offshore”, The Nautical Institute, pp. 94-99.
- [6] Nam, T. K. and C. H., Jung(2013), “A Study on the Means of Resistance Estimation for the Vessel in the Accident”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, pp. 185-186.
- [7] Reid, G. H.(2004), “Primer of Towing”, Cornell Maritime Press, pp. 172-187.
- [8] SNAK(2012), “Ship’s Resistance and Propulsion”, The Society of Naval Architects of Korea, pp. 21-113.
- [9] Taylor, D. W.(1954), “ A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series”, Report 806, p. 171.
- [10] US Navy(2002), “US Navy Towing Manual”, SL740-AA-MAN-010, Ch. 3, pp. 1-9.
- [11] Yoon, J. D.(2002), “Theory and Practice of Ship Handling”, Sejong, p. 200.

원고접수일 : 2014년 07월 08일

원고수정일 : 2014년 08월 06일

게재확정일 : 2014년 08월 27일