

사고선박 예인시 표류각 영향에 대한 저항 추정법 개발

김은찬 · 최혁진[†] · 이승국

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Development of Resistance Prediction Method for the Effect of Drifting Angle at the Towing Operation of a Disabled Ship

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

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

해상에서 사고선박을 예인하기 위해서는 파랑과 바람 등 각종 외력의 상태와 표류각 등 선체 자체의 상태에 대한 피예인선의 저항 증가를 정확하게 추정하여야 한다. 대부분의 사고 선박은 선체 정면 방향으로 예인되지 못하고 일반적으로 표류각 만큼 기울어진 상태로 예인된다. 이러한 표류각에 의한 저항 증가는 무시할 수 없는 정도이다. 본 논문에서는 기존의 각종 표류각에 의한 저항 증가 추정 방법을 고찰하였다. 또한 표류각에 대한 새로운 방법 즉 정면-측면 투영면적 비율 방법과 다중회귀분석에 의한 경험식 방법을 도출하였다. 이 정면-측면 투영면적 비율방법은 예인상태 추정 프로그램에 적용되었고, 이 방법은 실제 상황에서 유용한 방법이라 확인되었다.

Abstract – When a disabled ship is being towed in a seaway, the resistance increase of the towed ship caused by both the external conditions such as wave and wind and the hull conditions such as drifting angle, should be accurately predicted. Most of the disabled ships cannot be towed in the front direction of hull, but they are usually towed in drifted direction with some drifting angle. In this sense, the resistance increase caused by the drifting angle is not an element to be ignored. In this paper, various methods for prediction of the resistance increase caused by the drifting angle are studied. In addition, new prediction methods such as front-lateral projected ratio method and empirical formula method by multiple regression analysis have been derived. The front-lateral projected area ratio method has been applied to a computer program for prediction of the towing condition, and this method has been approved to be a useful method in practical situations.

Keywords: Towed Ship(피예인선), Tug Boat(예인선), Resistance Increase(저항증가), Drifting Angle(표류각), Disabled Ship(사고선박)

1. 서 론

사고선박을 예인할 때, 예인력을 산정하고 예인 시나리오를 세우기 위해서는 사고선박 즉 피예인선에 대한 저항을 정확하게 추정하여야 한다. 피예인선의 저항 추정을 위해서는 피예인선 자체의 정수중 저항과 함께 각종 외력에 대한 부가저항을 추정하여야 한다. 최혁진 등(Choi *et al.*[2012])은 사고선박의 전체 저항을 비교적 간단하면서도 정확히 추정하는 방법을 발표한 바 있는데, 이 때 포함된 외력으로는 바람, 선체 표류, 선체 표면 거칠기, 선체 파손, 프로펠러 고착, 파랑, 천수효과, 조류 효과 등이 포함되었다. 또한 김은

찬 등(Kim *et al.*[2014b])은 피예인선의 다양한 예인 계획에 따른 예인상태 추정 프로그램을 발표한 바 있는데, 이 논문을 통해 한척 또는 여러 척의 예인선 또는 푸셔선을 이용하여 한척의 피예인선을 예인할 때, 피예인선의 예인 방향과 예인 속력을 추정하는 방법을 정립하고 전산 프로그램을 개발하였다.

일반적으로 피예인선의 저항이라 함은 선체를 선수 정면 방향으로 예인하는 경우에 대한 것을 말하지만, 대부분의 경우 피예인선이 선수 정면방향으로만 예인되는 것이 아니므로, 피예인선의 전진 방향이 선수 정면방향인 경우 즉 표류각이 있는 상태에 대한 저항성능 추정 방법이 꼭 필요하다. 피예인선이 선수 정면 외의 방향 즉 임의의 표류각이 주어진 상태로 예인되는 경우, 표류각 변화에 의한 저항증가가 크게 생길 것이다. 최혁진 등의 논문(Choi *et*

[†]Corresponding author: hjchoi@kriso.re.kr

al.[2012])에서는 선체 표류각 변화에 의한 저항 증가량을 IMO 15016:2002 방법으로 추정하였으나, 그 추정값은 너무 작다고 판단되었다. 한편 김은찬 등의 논문(Kim et al.[2014b])에서는 선체 측면을 하나의 평면으로 간주하여 평판의 직각방향 저항에 대한 경험치를 사용하여 추정하였으나, 그 추정값은 너무 큰 값을 보여준다고 판단되었다.

본 논문에서는 보다 정확하게 선체 표류각 변화에 의한 저항 증가량을 추정하기 위하여, 그동안 발표된 각종 경험식을 살펴보고, 실선 시험 결과와 비교함으로써 신뢰성 있는 표류각 영향 추정법을 도출하였다. 또한 이 추정법을 김은찬 등의 예인상태 추정 프로그램(Kim et al.[2014b])에 적용하여 그 활용성을 확인하였다.

2. 기존의 표류각 영향 저항 증가 추정 방법

선체 표류각에 의한 저항 증가량은 선체 측면 형상, 표류각 및 속력 등에 따라 그 값이 크게 달라지게 될 것이다. 선체 표류각에 의한 저항증가량을 추정하기 위하여 모형실험을 수행할 경우 많은 비용과 시간이 소요되므로 통계해석적 방법으로 간편한 추정이 필요하다. 본 논문에서는 기존의 표류각 변화에 의한 저항증가량 추정 방법으로서 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법 방법, 평판 저항 경험식 방법 그리고, IMO 유류 오염 구난 매뉴얼의 경험치를 검토하였다.

2.1 ISO 15016:2002 방법

ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법(ISO [2002])에서는 선체 표류에 의한 저항증가량을 (1)식과 같이 추정하고 있다.

$$R_{Drift}(N) = \frac{1}{4} \pi \rho_s T_m^2 V_s^2 \beta^2 \quad (1)$$

이 식은 단지 선속과 표류각과 선체 흘수만을 사용하는 매우 간단한 계산식이다. 이 식은 일본조선연구협회 SR208 보고서(SR208 [1993])에 실린 방법을 ISO 표준 해석법에서 채택한 것이다. 이 식의 입력자료로는 선체 흘수만 있을 뿐 선체 횡단면적이나 길이가 빠져 있기 때문에 합리적인 식이라 볼 수 없고, 또한 일반적으로 표류각 영향을 지나치게 작게 추정한다고 알려져 있기에 널리 사용되지 않고 있는 방법이다.

2.2 평판 저항 경험식

김은찬 등(Kim et al.[2014b])의 논문에서는 선체 횡방향의 형태를 하나의 판으로 가정하여 선체 측면 90도 방향의 저항을 추정하기 위해, 미국 해군의 예인 매뉴얼(US Navy[2002])에서 프로펠러 고착에 의한 저항 증가를 계산하는 방법을 참고하여 식 (2)과 같은 경험식을 사용 하였다.

$$R_{LH}(N) = 178.93 A_{LA} V_k^2 \quad (2)$$

한편, 국내 구난업계에서 경험적으로 사용하는 식은 식 (3)과 같다.

이 식은 출처가 불분명한 경험식이다. 식 (3)을 식 (2)과 동일한 단위로 환산하면 식 (4)과 같이 계수가 바뀌게 된다.

$$R_{LH}(t) = 73.2 A_{LA} V_s^2 \quad (3)$$

$$R_{LH}(N) = 189.95 A_{LA} V_k^2 \quad (4)$$

식 (2)은 계산식 도출 근거가 분명하고 식 (4)과 계수 차이도 크지 않으므로, 실제 사용하는데 큰 문제가 없다고 판단되었었다.

이렇게 구한 횡방향 저항에 표류각 방향의 비율을 곱해서, 식 (5)과 같이 표류각에 의한 저항 증가량을 추정하게 된다.

$$R_{Drift}(N) = R_{LA} \sin \alpha_\beta \quad (5)$$

그러나, 이 식을 사용했을 때 항상 지나치게 큰 추정치가 얻어지므로 적절한 방법은 아니라고 판단되고 있다.

2.3 IMO 유류오염 구난 매뉴얼 경험치

표류각 변화에 의한 저항증가량을 실제로 측정한 자료는 흔하지 않는데, IMO 유류오염 구난 매뉴얼(IMO[1997])의 Appendix 3을 보면, 예인시 표류각 변화에 의한 저항 증가량을 Table 1과 같이 나타내고 있다.

Table 1에서 표류각이 0도인 경우의 저항을 1.0 으로 놓고 표류각 변화에 의한 저항 증가 비율을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 2만 4천톤급 선박과 11만 2천톤급 선박은 거의 동일한 값을 나타내고 있다.

Fig. 1을 보면, 가장 큰 선박인 26만톤급 유조선의 경우 다른 나머지 3척과는 매우 상이한 경향을 보여주고 있다. 나머지 3척만 가지고 볼 때 2노트로 예인되는 경우에는, 표류각이 0도에서 10도, 20도, 30도로 증가할 때, 저항은 2.3배, 3.8배, 5.5배로 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 3노트로 예인되는 경우에는 저항은 각각 2.7

Table 1. Resistance to Tow in Still Water Condition by IMO Salvage Manual

Size of Ship Being Towed	Angle of Yaw	Resistance (tons)	
		2 knots	3 knots
24,000 tonnes deadweight	0	2.3	4.3
	10	5.5	11.4
	20	8.7	18.7
	30	13.0	28.3
68,000 tonnes deadweight	0	4.7	8.5
	10	10.8	25.5
	20	17.3	37.0
	30	25.8	56.0
112,000 tonnes deadweight	0	6.2	11.3
	10	14.8	30.5
	20	23.4	50.2
	30	35.0	76.5
260,000 tonnes deadweight	0	7.9	14.0
	10	15.2	30.0
	20	39.6	85.0
	30	51.8	112.7

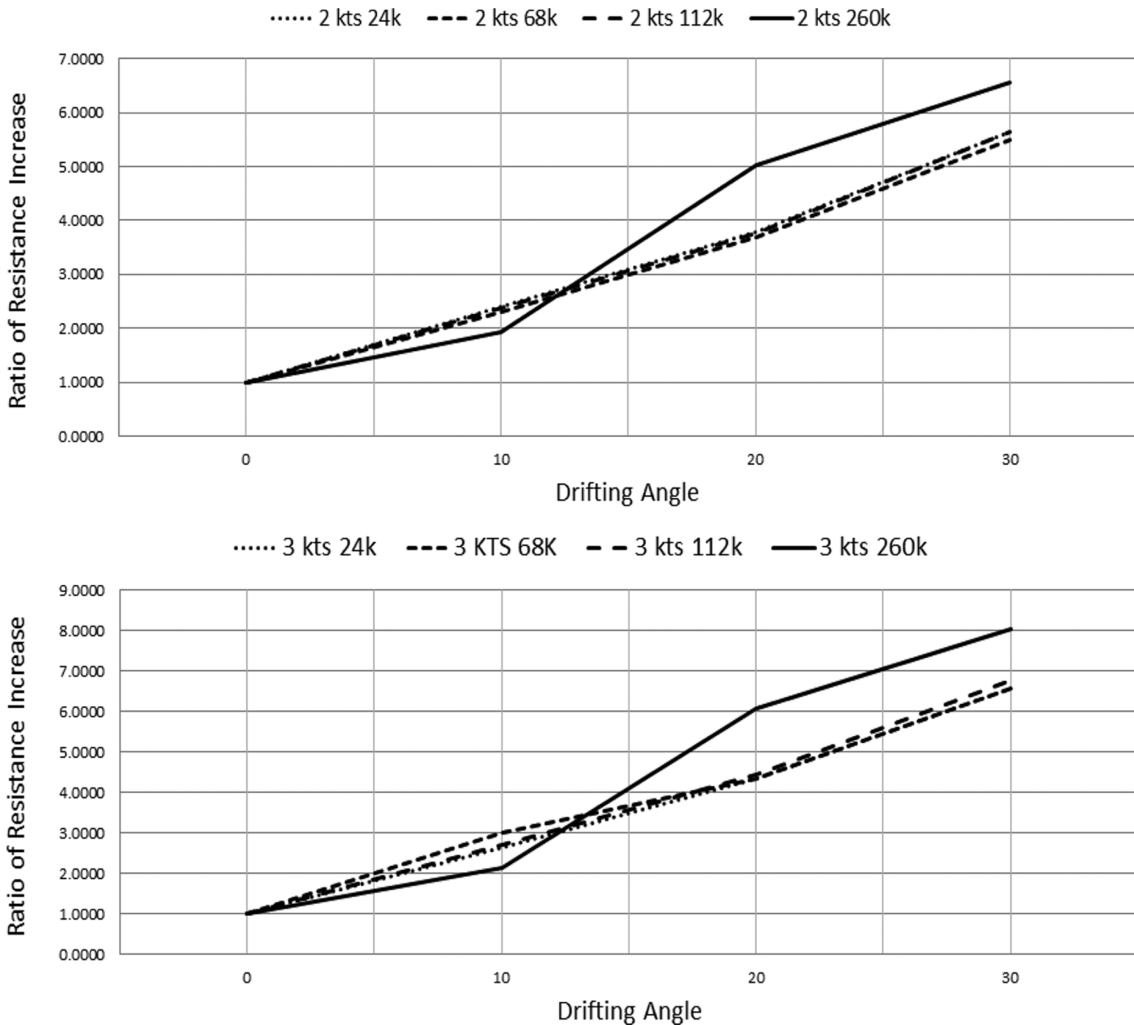


Fig. 1. Resistance Increase Ratio to Tow in Still Water Condition by IMO Salvage Manual.

배, 4.4배, 6.7배로 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

3. 표류각 변화 저항증가량 추정법 도출

피에인선의 표류각 변화에 의한 저항 증가량을 보다 손쉽게 정확하고 추정하기 위해, 2.2절에서 기술한 평판저항 경험식을 일부 보완한 방법으로서 정면-측면 투영면적 비율 방법을 도출하였고, 또한 2.3절에 기술한 IMO 유류 오염 구난 매뉴얼의 경험치를 다중회귀 분석한 경험식 방법을 도출하였다.

3.1 정면-측면 투영면적 비율 방법

선체 횡방향의 형태를 하나의 판으로 가정하여 2.2절의 식 (2)을 이용하여 추정하는 방법은 지나치게 큰 값을 보여주므로, 개선이 필요하였다.

식 (2)의 변수를 볼 때 저항증가량은 수면 아래 선체의 투영면적과 비례함을 알 수 있다. 따라서 선수 정면 방향의 저항 추정식과 측면 90도 방향의 저항 추정식이 투영면적을 제외한 나머지 계수는

모두 동일하다고 간주한다면, 비교적 정확하게 알고 있는 정방향의 선체 저항값을 기준으로하여, 선체의 선수 정면 방향의 투영면적과 측면 90도 방향의 투영면적의 비율을 고려하여 표류각 변화에 의한 저항증가량을 추정할수 있다고 판단하였다. 이러한 가정 하에 얻은 표류각 변화에 의한 저항증가량 추정식은 식 (6)과 같다.

$$R_{Drift}(N) = R_{Basic} \cdot (A_{Drift}/A_{TH}) \tag{6}$$

그러나 식 (6)을 이용하는 경우 그 결과는 IMO 유류오염 구난 매뉴얼의 Appendix 3 등의 경험치보다 약 1/2로 작은 것을 알 수 있었다. 따라서, 실제 적용을 위하여 임의로 식 (6)에 2.0을 곱하여 식 (7)을 도출하였다.

$$R_{Drift}(N) = R_{Basic} \cdot (A_{Drift}/A_{TH}) \cdot 2.0 \tag{7}$$

3.2 IMO 유류오염 구난 매뉴얼의 경험치 회귀식

위 2.3절의 IMO 유류오염 구난 매뉴얼 경험치를 도식화한 Fig. 1을 보면, 2노트와 3노트의 경우 각각 26만톤급 선박을 제외하고는 저

항값이 선체 표류각에 거의 비례함을 알 수 있다.

따라서, 26만톤급을 제외한, 2.4만톤, 6.8만톤, 11.2만톤 급 선박에서의 표류각 변화에 의한 저항 증가량을 표류각 0도에서의 값과의 비율로 수식화 하였다. 즉 표류각과 선속을 독립변수로 하고, 표류각 0도 기준 저항증가량 비율을 종속변수로하여 다중회귀분석을 하였다.

이렇게 도출된 회귀식은 식 (8)과 같다. 이 때의 중상관계수는 0.9917, 표준오차는 0.2645 이다.

$$R_{Drift}(N) = R_{Basic}(0.1686a_{\beta} + 0.5278V_K - 1.4089) \quad (8)$$

이 회귀식은 대형 유조선을 2노트와 3노트로 예인하는 경우의 자료를 이용하여 도출한 식이므로, 대형 선박의 저속 영역에 적절한

Table 2. Comparison of Predicted Drift Force between Various Prediction Methods

Ship Type	Tanker			Cargo			Barge		
LPP (m) :	320			130			90		
Bradth (m) :	58			20			24		
Design Draft (m) :	20.8			7.8			0.85		
Lateral Area of Hull (m ²)	6600			1000			75		
Projected Area of Hull (m ²)	1200			150			20		
Ship Speed (knot)	3			3			3		
Basic Hull Resistance (ton)	8.43			1.20			1.30		
Drifting Angle (deg)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
ISO : Rdrift [Formula (1)]	2.58	10.31	23.19	0.36	1.45	3.26	0.00	0.02	0.04
ISO : Rtotal = Rbasic+Rdrift	11.01	18.74	31.62	1.56	2.65	4.46	1.30	1.32	1.34
Plate : Rlh [Formula (2)]	1083.80	1083.80	1083.80	164.21	164.21	164.21	12.32	12.32	12.32
Plate : Rdrift [Formula (5)]	188.15	370.66	541.90	28.51	56.16	82.11	2.14	4.21	6.16
Plate : Rtotal = Rbasic+Rdrift	196.58	379.09	550.33	29.71	57.36	83.31	3.44	5.51	7.46
P.Area : Rth	197.05	197.05	197.05	24.63	24.63	24.63	3.28	3.28	3.28
P.Area : Rdrift [Formula (6)]	16.10	31.71	46.37	2.78	5.47	8.00	1.69	3.33	4.88
P.Area : Rtotal = Rbasic+Rdrift	24.53	40.14	54.80	3.98	6.67	9.20	2.99	4.63	6.18
IMO Reg.: Rdrift [Formula (7)]	15.68	29.90	44.11	2.23	4.26	6.28	2.42	4.61	6.80
IMO Reg.: Rtotal = Rbasic+Rdrift	24.11	38.33	52.54	3.43	5.46	7.48	3.72	5.91	8.10

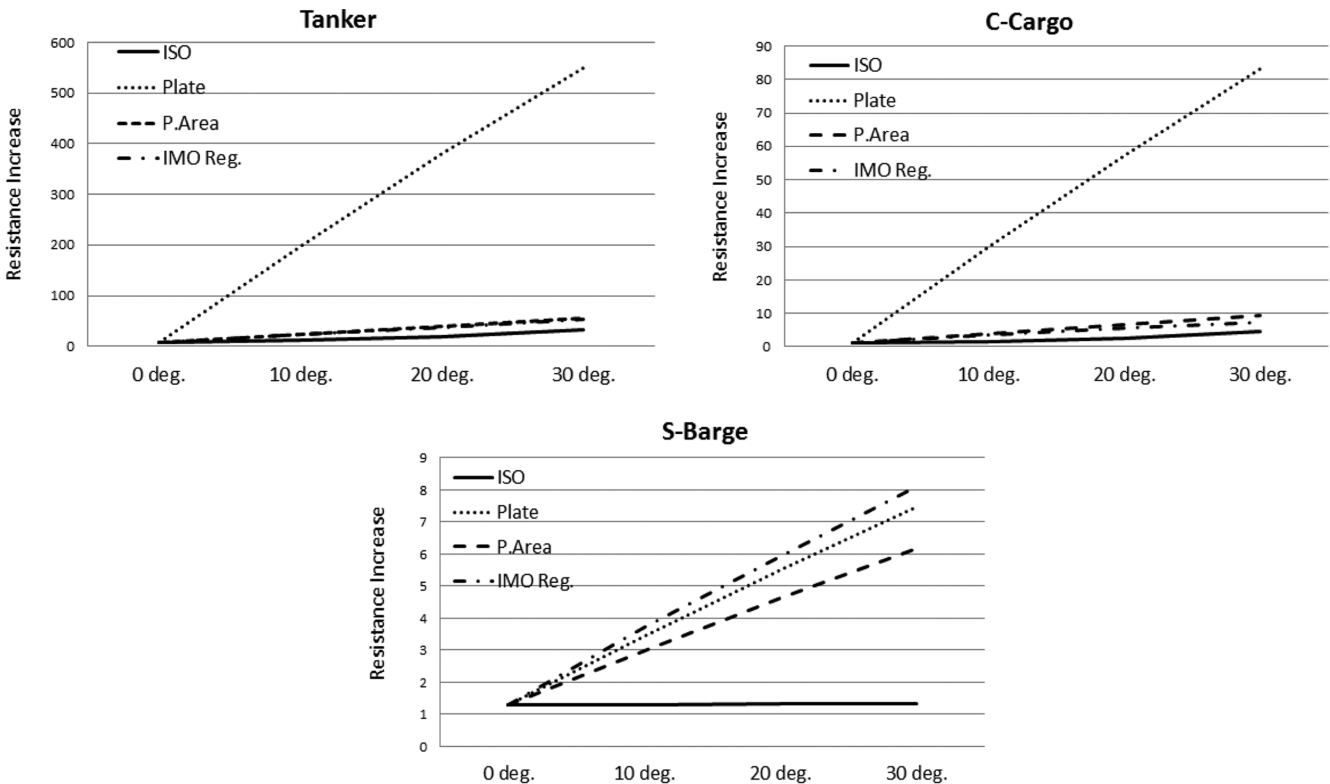


Fig. 2. Comparison of total resistance due to drifting angle between various prediction methods.

식이라 판단된다.

3.3 표류력 추정 결과 비교

여러 가지 방법으로 추정한 표류각 변화에 의한 저항증가량을 비교해 보기 위해, 30만톤급 유조선과 8천톤급 화물선 그리고 90 m 급 바지선에 대해 각각 3노트에서, 10도 20도 30도에 대해 본 논문에서 기술한 각종 방법의 저항증가량 추정값을 Table 2와 같이 계산해 보았다. 이 표에는 다음과 같이 4가지 방법으로 추정된 표류각 변화에 의한 저항증가량과 전체저항 추정량을 비교하고 있다.

- ISO 15016:2002 해석법
- 평판 저항 경험식
- 정면-측면 투영면적 비율 방법
- IMO 유류오염 구난 매뉴얼의 경험치 회귀식

Fig. 2는 각 선박의 표류각 변화에 의한 전체저항을 추정 방법별로 비교하고 있다.

각 방법에 의한 표류력 계산 결과를 비교해 보면, ISO 15016:2002 방법이 가장 작으며, 일반 선박의 경우 평판 저항 경험식 방법이 지나치게 가장 크며, 평판 저항 경험식을 보완한 정면-측면 투영면적 비율 방법과 IMO 유류오염 구난 매뉴얼 경험치의 회귀식이 유사한 값을 보여주고 있다.

IMO 유류오염 구난 매뉴얼 경험치의 회귀식이 실선 실험을 통해 얻은 신뢰할만한 값을 고려할 때, IMO 유류오염 구난 매뉴얼 경험치의 회귀식 방법은 물론, 이 경험치를 통해 보정해준 정면-측면 투영면적 비율 방법도 실제 구난 현장에서 활용 할만 하다고 볼 수 있다.

Table 3. An Example Output for the 300 K VLCC Ship (Drift Force by Front-Lateral Projected Area Ratio Method)

MULTI-BARGE MULTI-DIRECTION SIMULATION (INTOW1A)									
FILE NAME: MT1A.EUN					02-SEP-15				
SHIP OWNER: KRISO-MARINE	LENGTH B P (M):	320.000	LATERAL A HULL (M2):	6600.0					
SHIP NAME: ISO 300K	BREADTH (M):	58.000	LATERAL A WIND (M2):	3900.0					
IMO NUMBER: IS01234567	DRAFT FWD (M):	20.800	ADDED FACTOR RES:	0.100					
	DRAFT AFT (M):	20.800	NO OF PUSHER/BARGE:	3					
	PROJECT A HULL(M2):	1200.0	METHOD OF LATERAL R:	1					
TOTAL SPEED: YKS(KNOT):	1.000	2.894	3.859	4.824	5.788	6.753	7.718	11.576	
TOTAL RESIST. RIT(KN):	50.0	155.7	253.2	375.9	523.5	695.7	892.5	1944.0	
#WIND RESIST. DEL#(KN):	20.0	31.4	36.2	41.5	47.3	53.4	60.0	90.5	
INITIAL CONDITION									
#WIND SPEED (M/S):	4.500	TOWED SPEED (KNOT):	5.000	SPEED #/CURR (KNOT):	4.378				
#WIND DIRECTION(DEG):	25.00	TOWED ANGLE (DEG):	10.00	HULL RES TOW (TON):	115.46				
CURRENT SPEED(KNOT):	0.800	TOTAL RES AHEAD(KN):	398.0	#WIND RES TOW (TON):	10.38				
CURRENT DIRECT(DEG):	39.00	#WIND RES AHEAD (KN):	42.5	TOTAL RES TOW (TON):	125.84				
		HULL RES AHEAD(TON):	39.88	#WIND RES SIDE (TON):	3.48				
		HULL RES LATER(TON):	438.73	CURRENT RES S (TON):	5.33				
TOW LONGITUDINAL LATERAL TOWING TOWING CABLE TOWING LATERAL CENTRAL									
NO POSITION(M)		ANGLE(DEG)	FORCE(TON)	RES	DRAG(TON)	DRAG(TON)	MOMENT(TON)		
1	160.000	0.000	M 5.00	140.0	0.05	132.49	11.59	1854.7	
2	-160.000	25.000	M 60.00	10.0	0.00	6.43	-7.66	-1510.6	
3	0.000	-29.000	F 0.00	40.0	0.00	39.39	6.95	1160.0	
TOTAL					178.31		10.88		1504.0
STABLE CONDITION									
#WIND SPEED (M/S):	4.500	TOWED SPEED (KNOT):	7.109	SPEED #/CURR (KNOT):	6.487				
#WIND DIRECTION(DEG):	25.00	TOWED ANGLE (DEG):	5.82	HULL RES TOW (TON):	165.81				
CURRENT SPEED(KNOT):	0.800	TOTAL RES AHEAD(KN):	756.1	#WIND RES TOW (TON):	12.90				
CURRENT DIRECT(DEG):	39.00	#WIND RES AHEAD (KN):	55.6	TOTAL RES TOW (TON):	178.71				
		HULL RES AHEAD(TON):	78.58	#WIND RES SIDE (TON):	3.78				
		HULL RES LATER(TON):	864.39	CURRENT RES S (TON):	4.66				
TOW LONGITUDINAL LATERAL TOWING TOWING CABLE TOWING LATERAL CENTRAL									
NO POSITION(M)		ANGLE(DEG)	FORCE(TON)	RES	DRAG(TON)	DRAG(TON)	MOMENT(TON)		
1	160.000	0.000	M 0.82	140.0	0.05	132.49	11.59	304.1	
2	-160.000	25.000	M 55.82	10.0	0.00	6.43	-7.66	-1464.1	
3	0.000	-29.000	F 0.00	40.0	0.00	39.79	4.06	1160.0	
TOTAL					178.72		7.99		0.0

Table 4. An Example Output for the 300 K VLCC Ship (Drift Force by Plate Resistance Empirical Method)

STABLE CONDITION					
#WIND SPEED (M/S):	4.500	TOWED SPEED (KNOT):	3.376	SPEED #/CURR (KNOT):	2.754
#WIND DIRECTION(DEG):	25.00	TOWED ANGLE (DEG):	5.82	HULL RES TOW (TON):	171.05
CURRENT SPEED(KNOT):	0.800	TOTAL RES AHEAD(KN):	195.0	#WIND RES TOW (TON):	7.65
CURRENT DIRECT(DEG):	39.00	#WIND RES AHEAD (KN):	33.5	TOTAL RES TOW (TON):	178.71
		HULL RES AHEAD(TON):	18.11	#WIND RES SIDE (TON):	2.22
		HULL RES LATER(TON):	1509.59	CURRENT RES S (TON):	37.61

4. 계산 결과 예

3.1절에서 도출한 정면-측면 투영면적 비율 방법을 피에인선의 예인계획에 따른 예인상태 추정 프로그램(Kim *et al.*[2014b])에 적용하여 기존 방법에 의한 결과와 비교하여 보았다.

Table 3은 표류각 변화에 의한 저항 증가를 식 (7)과 같은 정면-측면 투영면적 비율 방법으로 계산한 것이다. 이 표에서 피에인선의 상태를 보여주는 안정 상태 값을, 기존의 식 (2)과 같은 평판 저항 경험식 방법의 결과인 Table 4와 비교하면(Kim *et al.*[2014b]), 피에인 속력은 3.376노트에서 7.109노트로 크게 증가하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에 포함된 표류각에 의한 저항증가량 추정식으로 계산한 결과는 비교적 작은 값을 보여 주고 있다. 반면에, 선체 측면을 평판으로 간주하여 저항증가량을 추정하는 평판저항 경험식으로 계산한 결과는 지나치게 큰 값을 보여 주고 있다.

선체 측면을 평판으로 간주하여 추정하는 방법을 개선하여, 선체 정면 투영면적과 측면 투영면적의 비율로부터 정면-측면 투영면적 비율 방법을 도출하였으며, 이 방법은 표류각 변화에 의한 저항증가량을 비교적 간편하고도 정확하게 추정할 수 있는 방법이라 판단되었다.

IMO 유류오염 구난 매뉴얼에 있는 예인시 표류각 변화에 의한 저항증가량 경험치를 활용하여 회귀식을 도출하였으며, 이 방법은 대형선의 표류각 변화에 의한 저항증가량을 추정하는데 유용하게 활용할 수 있는 추정식이라 판단되었다.

선체 정면-측면 투영면적 비율 방법을 예인상태 추정 프로그램에 적용한 결과, 적절한 경향을 보여주고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 주요사업으로 수행하고 있는 “해양사고 초기대응 및 구난기술 지원 시스템 개발” 과제의 연구결과 중 일부분을 밝힌다.

기호

- a_{β} : 표류각(deg)
- A_{Drift} : 수면하 표류방향 투영면적(m²)
- A_{LH} : 수면하 측면방향 투영면적(m²)
- A_{TH} : 수면하 정면방향 투영면적(m²)
- R_{Basic} : 정방향 선체 저항(N 또는 ton)
- R_{Drift} : 표류방향 표류저항(N 또는 ton)
- R_{Total} : 표류방향 전저항(N 또는 ton)
- R_{LH} : 측면방향 선체 저항(N 또는 ton)
- T_m : 평균 흘수(m)
- V_K : 선속(knot)
- V_S : 선속(m/s)
- β : 표류각(rad)
- ρ_A : 공기 밀도(kg/m³)
- ρ_S : 해수(kg/m³)

References

[1] 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), 150-155

[2] IMO, 1997, Salvage Manual on Oil Pollution Section III, IMO

Publication, 38.

[3] ISO, 2002, Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, International Standard ISO 15016, 39.

[4] Japan Ship Research Association SR208, 1993, New Speed Trial Analysis Method, Report of SR208 Committee (Japanese), 28.

[5] 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), 211-216.

[6] Kim, E.C., Choi, H.J. and Lee, S.G., 2014a, A Study on the Simplified Prediction Method of Air Resistance for Towing Force Calculation of Disabled Ships, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol.17 No.3 (Korean), 198-204

[7] Kim, E.C., Choi, H.J. and Lee, S.G., 2014b, Development of Prediction Program for the Towing Condition associated with Various Towing Operations of a Disabled Ship, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol.17 No.4 (Korean), 318-323.

[8] US Navy, 2002, U. S. Navy Towing Manual, SL740-AA-MAN-010, G-2.

Received 8 July 2015

Revised 2 October 2015

Accepted 8 October 2015