

## ISO 15016 해석법에 의한 사고선박 예인 시 파랑 중 부가저항 추정 프로그램 개발

최혁진 · 김은찬\* · 이승국  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

### Development of Prediction Program of Added Resistance Due to Waves at the Towing Condition of a Disabled Ship Using ISO 15016 Analysis Method

Hyuek-Jin Choi, Eun-Chan Kim<sup>\*</sup> and Seung-Guk Lee

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

#### 요 약

해상에서 사고선박을 예인할 때 피예인선의 저항을 추정하는 것은 중요한 과정의 하나이다. 피예인선에는 선체 자체의 기본 저항 외에 각종 부가저항이 있는데, 가장 큰 성분중의 하나로 파랑에 의한 부가저항을 들 수 있다. 본 논문에서는 ISO 15016 표준의 이론해석 방법에 의해 사고 선박 예인시 파랑중 부가저항을 추정하는 알고리즘을 정립하고, 이를 전산 프로그램으로 구현하였다. 예제 선박의 계산 결과를 기존의 표준 결과와 비교하였고, 이 알고리즘과 전산 프로그램은 실제로 사고 선박의 저항과 이에 따른 예인력 추정시 사용하기에 적절한 것으로 판단되었다.

**Abstract** – It is one of the important processes to predict the resistance of the towed ship when towing a disabled ship on the sea. Besides the basic resistance of hull itself, there are various added resistance, especially the added resistance due to waves can be considered one of the biggest component. In this paper, the algorithm which predict the added resistance due to waves of a disabled ship by theoretical analysis method of ISO 15016 standard was established, and realized as a computer program. The calculated result for an example ship was compared with existing standard one, and it is considered that this algorithm and computer program are appropriate to use for predicting the resistance and towing force of the disabled ship actually.

**Keywords:** Added Resistance(부가저항), Towed Ship(피예인선), Wave(파랑), Wind Wave(풍파), Swell(너울)

#### 1. 서 론

해상에서 사고선박을 예인할 때, 가장 먼저 수행해야 하는 것은 사고를 당한 피예인선의 저항을 정확하게 추정하는 것이다. 사고 선박의 저항은 사고선박 자체의 정수중 선체 저항에 각종 외력에 대한 부가저항을 더하여 계산하게 된다. 정수 중 선체 저항은 해당 선박에 대한 모형시험 결과가 있는 경우 모형시험 결과를 이용하여 추정할 수 있으며, 모형시험 결과가 없는 경우에는 경험식 및 도표 등을 이용하여 추정하게 된다. 외력에 의한 부가저항은 바람, 파랑, 표류력, 선체 표면 거칠기, 선체 파손, 프로펠러 고착, 천수 효

과, 조류 영향 등을 들 수 있는데, 대부분 선박의 경우 이러한 부가저항에 대한 모형시험 결과가 없으므로, 이들 부가저항은 관련 경험식 및 도표 등을 이용하여 추정하게 된다.

그동안 국내외에서 사고선박 구난 시 사용해 온 저항 추정 방법은 컴퓨터가 사용되기 이전에 구축된 방법으로서, 계산 과정이 매우 단순하고 그 정밀도 또한 낮다고 볼 수 있다(US Navy[2002]). 따라서 구난 현장에서는 이들 방법으로 계산 한 후 매우 높은 안전율을 적용하여 사용하고 있으므로, 비합리적이고 악천후 등에서는 구난 예인에 실패하는 사례가 발생하기도 한다. 국내에서 지난 몇 년간 이러한 구난 선박의 저항 추정 정밀도를 향상시키는 연구를 수행해 왔는데, 선체 기본 저항과 각종 부가저항 추정(Choi *et al.*[2012]), 마지선 저항 추정 정밀도 향상(Kim *et al.*[2013]), 공기저항 추정

<sup>\*</sup>Corresponding author: eckim@kriso.re.kr

정밀도 향상(Kim *et al.*[2014]) 등에 대한 연구를 진행해 왔다.

각종 외력에 의한 부가저항 가운데 가장 큰 성분으로서는 바람에 의한 부가저항과 파랑에 의한 부가저항을 들 수 있다. 이 가운데 파랑 중 부가저항 추정에는 모형시험 결과가 거의 없으며 이론 계산을 수행한다 해도 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 따라서 실제 사고 선박의 구난작업 시 예인력 추정에서는 파랑 중 부가저항은 거의 포함시키지 않고, 전체 저항 값에 매우 단순한 경험치를 곱해 주는 정도로 추정을 하고 있다. 본 논문에서는 최근 가장 신뢰할 수 있는 ISO 15016:2002 해석법을 적용하여 피예인선의 저항을 추정하는 알고리즘을 정립하고 이를 전산 프로그램으로 구현하였다.

## 2. 파랑중 저항증가 추정 방법

### 2.1 ISO 15016:2002 방법

본 논문에서는 파랑중 부가저항을 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에서 채택한 방법을 적용하였다(ISO[2002]). 이 ISO 15016 표준 해석법은 2002년 처음 ISO에서 제정되었는데, 이는 조선소에서 선박을 건조한 후 선주에게 인도하기 전에 선박의 선속을 확인하기 위한 속력시운전의 결과 해석을 위해 개발된 것이다. 이 ISO 15016 표준 해석법은 2009년 IMO에서 제정한 신조선의 에너지 효율 설 계지수(EEDI, Energy Efficiency Operational Index) 검증에 위한 방법으로 채택되어 전 세계적으로 주목을 받은 바 있다(IMO[2009], IMO[2013]). 이는 실험적 성능 해석법 가운데 ISO 15016 표준 해석법이 가장 정확하다고 판단한 결과라고 볼 수 있다.

ISO 15016 표준 해석법에는 외력에 대한 영향으로서 파랑에 의한 부가저항, 바람에 의한 부가저항, 항로조종에 의한 부가저항, 표류에 의한 부가저항, 수온 및 염도 차이에 의한 저항 변화, 배수량 차이에 의한 저항 변화, 천수 효과에 의한 선속 변화 등이 포함되어 있다. ISO 15016 표준 해석법은 속력시운전을 시행하는 실험에서 임의의 동력으로 추진되는 선박에서 실험에서의 각종 부가저항을 빼 주어서, 순수한 정수중 선체 저항을 계산해 내는 방법을 정한 것이다. 그러나 본 논문에서 다루고자 하는 것은 순수한 정수중 선체 저항에서 시작하여, 예측되는 해상상태에서의 각종 부가저항을 계산하여 정수중 선체저항에 더해 주어서 전체 저항을 추정하는 것으로서, 속력시운전과는 서로 반대되는 과정인 것이다. 그러나 이 두 가지 추정 과정은 빼 주거나 더해 주는 차이만 있을 뿐, 부가저항 자체를 계산하는 내용은 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 실험에서의 저항 성능을 추정하는데 이 ISO 15016 표준 해석법의 일부를 사용하는 것에는 문제가 없다고 판단된다.

ISO 15016 해석법은 2015년에 개정되었다(ISO[2015]). ISO 15016의 2015년 개정본은 파랑 중 반사파 영향 등 일부 변경이 있었으나, 큰 틀은 2002년도 해석법을 그대로 유지하고 있다. 개정된 해석법의 파랑중 부가저항 계산 내용을 보면, 선체운동에 의한 저항증가 계산 방법은 변함이 없으나 반사파에 의한 저항증가 계산 방법은 변경이 되었는데, 변경된 반사파에 의한 저항증가 계산 방법은 모형시험이 필요하며 모형시험 자료가 없는 경우 그 정밀

도는 낮아지는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 ISO 15016 해석법의 2002년도 표준인 ISO 15016:2002 해석법을 적용하였다.

본 논문에서는 ISO 15016 표준 해석법의 각종 부가저항 계산 방법 가운데, 파랑에 의한 부가저항 계산 방법만을 인용하여 다루고자 하는데, 파랑으로부터 기인된 선체운동에 의한 저항증가 계산은 Maruo 방법(Maruo[1960])을 사용하였으며, 반사파에 의한 저항증가 계산은 Faltinsen 방법(Faltinsen *et al.*[1980])을 사용하였다.

### 2.2 선체운동에 의한 저항증가 계산

저항증가 응답함수는 Maruo (Maruo[1960])에 따라 (1)식과 같이 계산하였다(ISO[2002]).

$$\frac{\Delta r_1}{\zeta_A^2} = \frac{\rho}{4\pi\zeta_A^2} \left\{ -\int_{-\infty}^{m_1} + \int_{m_2}^{m_3} + \int_{m_4}^{\infty} \right\} \times \frac{k_U(m)(m - k\cos x)}{\sqrt{k_U^2(m) - m^2}} \times (|C(m)|^2 + |S(m)|^2) dm \quad (1)$$

여기에서,

$$C(m) = \int_L Q(x) e^{imx} dx$$

$$S(m) = \int_L D(x) e^{imx} dx$$

$$m_1 = -\frac{k_0}{2}(1 + 2\tau \pm \sqrt{1 + 4\tau})$$

$$m_2 = -\frac{k_0}{2}(1 + 2\tau \pm \sqrt{1 - 4\tau})$$

$$k_U(x) = \frac{(m + k_0\tau)^2}{k_0}$$

$$\tau = \frac{V_S \omega_e}{g}$$

$$k = \omega^2/g$$

$$k_0 = g/V_S^2$$

(1) 식에서 Kochin 함수  $C(m)$ 와  $S(m)$ 는 선체주변의 유장을 나타낼 특이점 분포에 따라 구해지는 것이다.  $C(m)$ ,  $S(m)$ 을 계산할 때에는 스트립 방법을 사용하였다.

### 2.3 단파장 범위에 대한 저항증가 간이계산

선수가 비대한 선형에서 단파장의 파는 선수부에서 반사되어 이것이 저항증가의 주요 성분이 된다. Strip법은 선체가 가늘고 길다고 가정한 것이므로, 비대한 선수에서의 반사파 영향을 정확히 고려할 수 없기 때문에 이 영향을 보정할 필요가 있다. 따라서 이런 경우에는 선체운동에 따른 저항증가 계산 결과에 (2)식과 같은 Faltinsen 방법(Faltinsen *et al.*[1980])의 계산 결과를 더해 주도록 하였다(ISO[2002]).

$$\frac{\Delta r_2}{\zeta_A^2} = \frac{1}{2} \rho g \alpha_1$$

$$\times \left[ \int_I \left[ \sin^2(\chi - \theta) - \frac{2wV_s}{g} \{ \cos\chi - \cos\theta \cos(\chi - \theta) \} \right] \sin\theta dl \right. \\ \left. + \int_{II} \left[ \sin^2(\chi + \theta) - \frac{2wV_s}{g} \{ \cos\chi - \cos\theta \cos(\chi + \theta) \} \right] \sin\theta dl \right] \quad (2)$$

여기에서,

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 F_1^2(1.5kd)}{\pi^2 F_1^2(1.5kd) + K_1^2(1.5kd)}$$

### 2.4 실패역에서의 저항증가 계산

단과장의 불규칙파를 운항하는 선박의 저항증가는 규칙파중 응답함수를 이용해서 (3)식과 같이 계산하였다(ISO[ 2002]).

$$R_{AW} = 2 \int_{-\pi}^{\pi} G(\alpha - \chi) \left[ \int_0^{\infty} S(f) \frac{\Delta r(f, a)}{\zeta_a^2} df \right] da \quad (3)$$

여기에서,

$$\frac{\Delta r}{\zeta_a^2} = \frac{\Delta r_1}{\zeta_a^2} + \frac{\Delta r_2}{\zeta_a^2}$$

### 3. 파랑중 저항증가 계산 프로그램 및 결과 검토

ISO 15016 해석법에 의한 파랑중 부가저항 계산은 준비 과정도 복잡하고 계산 시간도 오래 걸리므로 사고선박 저항 추정 프로그램에 직접 포함시켜 함께 계산하는 것은 부적절하다고 판단되었다.

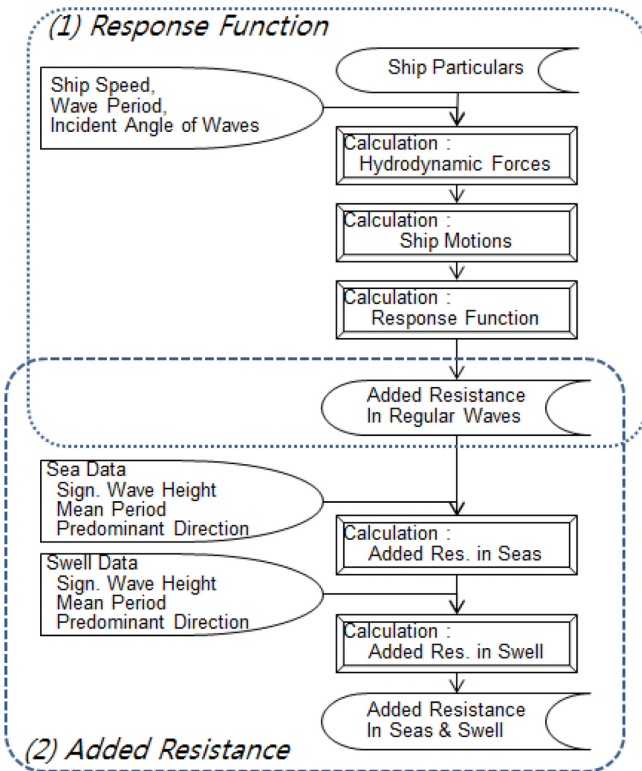


Fig. 1. Flowchart of the Program for Calculation of Added Resistance in Waves (PNT3-WAVES).

따라서 사고선박 저항 추정 프로그램 PNT3-MAIN과는 별개로, ISO 15016 해석법에 의한 파랑중 부가저항 계산 프로그램 PNT3-WAVES를 별도로 만들어 사용하였다.

파랑 중 부가저항  $R_{AW}$ 는 ISO 15016:2002 해석법에 따라 두 단계로 계산하도록 하였다. 먼저 사전 계산으로서 규칙파 중 부가저항의 응답함수를 계산해 둔 후, 다음으로 실패역의 파랑 상태에 대한 불규칙파에서의 부가저항을 계산하게 된다. 파랑에 의한 선체 운동에 따른 부가저항은 Maruo 방법을 사용하고, 반사파 영향은 Faltinsen 방법을 사용하였다. 이들 파랑 중 부가저항 계산은 파랑을 풍파(Wind Wave 또는 Seas)와 너울(Swell)로 구분하여 양쪽 모두를 각각 계산하여 합산하도록 하였다.

계산 과정을 보면 Fig. 1과 같다.

완성된 PNT3-WAVES 프로그램을 이용하여 파랑중 부가저항을 계산한 결과를 Fig. 2에서 보여주고 있다. Fig. 2의 결과는 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에 제시된 예제와 동일한 30만 톤급 유조선에 대해, 역시 동일한 해상 상태에 대해 계산한 것이다.

Fig. 2에서 보여주고 있듯이, ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에서 예제 계산으로 제시된 파랑 조건을 보면 각각의 항주

=====												
ADDED RESISTANCE DUE TO WAVES FOR PNT3 : PNT3-WAVES												
=====												
PROGRAMMED BY KRIISO												
=====												
FILE NAME :	300EX.INR											
SHIP NAME :	ISOSAMH											
* LPP :	318.000 M											
* BREADTH :	58.000 M											
* DEPTH :	29.000 M											
DRAFT												
* MEAN= :	18.500 M											
* FP= :	18.500 M											
* AP= :	18.500 M											
=====												
WATERLINE OFFSETS : X(METER:FP=0)/Y(METER:B/2)												
	0.00	7.95	15.90	23.85	31.80	47.70	63.60	95.40	130.38	159.00	174.90	
	206.70	238.50	254.40	270.30	286.20	294.15	302.10	310.05	318.00	323.41	324.20	
	0.00	8.24	15.17	19.73	23.05	27.28	28.63	29.00	29.00	29.00	29.00	
	29.00	29.00	28.30	25.87	21.89	19.25	16.68	13.85	9.77	6.46	0.00	
=====												
CORRECTION METHOD OF ADDED RESISTANCE :												
* SEA WAVE AND SWELL	2 : SEA WAVE AND SWELL											
* EFFECT OF SHIP MOTION	1 : MARUO METHOD											
* EFFECT OF WAVE DIFFRACT.	1 : FALTINSEN METHOD											
=====												
WAVE CONDITIONS												
SHIP SPEED (KNOT) :	8.570	10.810	11.760	13.960	14.030	15.710	16.360	15.110				
	16.400	15.400										
WAVE PERIOD (SEC) :	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	2.80	2.80				
	2.80	2.80										
WAVE HEIGHT (M) :	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50				
	0.50	0.50										
WAVE INCD.ANG. (DEG) :	170.0	350.0	170.0	350.0	170.0	350.0	350.0	170.0				
	350.0	170.0										
SWELL PERIOD (SEC) :	10.59	10.59	10.59	10.59	11.32	11.32	11.32	11.32				
	11.32	11.32										
SWELL HEIGHT (M) :	2.00	2.00	2.00	2.00	2.50	2.50	2.50	2.50				
	3.00	3.00										
SWELL INCD.ANG. (DEG) :	40.0	220.0	40.0	220.0	40.0	220.0	220.0	40.0				
	220.0	40.0										
=====												
ADDED RESISTANCE DUE TO WAVES												
SHIP SPEED (KNOT) :	8.570	10.810	11.760	13.960	14.030	15.710	16.360	15.110				
	16.400	15.400										
MOTION,SEA WAVE (KN) :	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	0.0	0.0										
MOTION,SWELL (KN) :	4.0	117.8	17.3	110.9	31.8	171.1	171.0	32.7				
	246.2	46.5										
DIFFRACT,SEA WAVE(KN) :	28.0	0.0	33.9	0.0	38.1	0.0	0.0	12.7				
	0.0	12.9										
DIFFRACTION,SWELL(KN) :	0.0	49.1	0.0	54.2	0.0	71.7	73.0	0.0				
	105.3	0.0										
=====												
TOTAL WAVE RESIST(KN) :	32.0	166.9	51.2	165.1	69.9	242.9	244.0	45.4				
	351.5	59.4										
=====												

Fig. 2. An Example Output from the Program of Calculation of Added Resistance due to Waves (PNT3-WAVES).

**Table 1.** Comparison of Results of Added Resistance due to Waves between the Program and ISO 15016:2002

Resistance (KN)		Speed (knots)										
		8.57	10.81	11.76	13.96	14.03	15.71	16.36	15.11	16.4	15.4	
Present Program	Motion	Wind Wave	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Swell	4.0	117.8	17.3	110.9	31.8	171.1	171.0	32.7	246.2	46.5
	Diffraction	Wind Wave	28.0	0	33.9	0	38.1	0	0	12.7	0	12.9
		Swell	0	49.1	0	54.2	0	71.7	73.0	0	105.3	0
	Total Wave Resistance		32.0	166.9	51.2	165.1	69.9	242.9	244.0	45.4	351.5	59.4
ISO 15016:2002 Standard	Total Wave Resistance	31.4	111.8	31.4	106.9	31.4	182.6	180.1	7.9	264.7	7.9	

마다 풍파와 너울의 입사각이 서로 다를 수 있다. 또한 풍파 끼리 또는 너울 끼리 비교해 보면 왕복 항주에서 입사각이 정반대임을 알 수 있는데, 이는 ISO 15016:2002 표준이 속력시운전에 대한 것이므로 동일 항로를 왕복 주행한 경우이므로 파랑의 입사각이 정반대인 것이다. 그 결과로서, 항주시마다 부가저항에 큰 차이를 보이는데, 이는 파랑의 입사각에 큰 영향을 받았음을 알 수 있다.

사고 선박 예인시의 파랑중 부가저항 저항 성분을 정확하게 예측한 사례가 없으므로, 본 논문에서는 계산 결과의 검증을 위해 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에 예제 계산으로 제시된 결과와 본 프로그램으로 계산된 Fig. 2의 결과를 비교하고자 한 것이다. 그 비교 결과를 Table 1에 실었다.

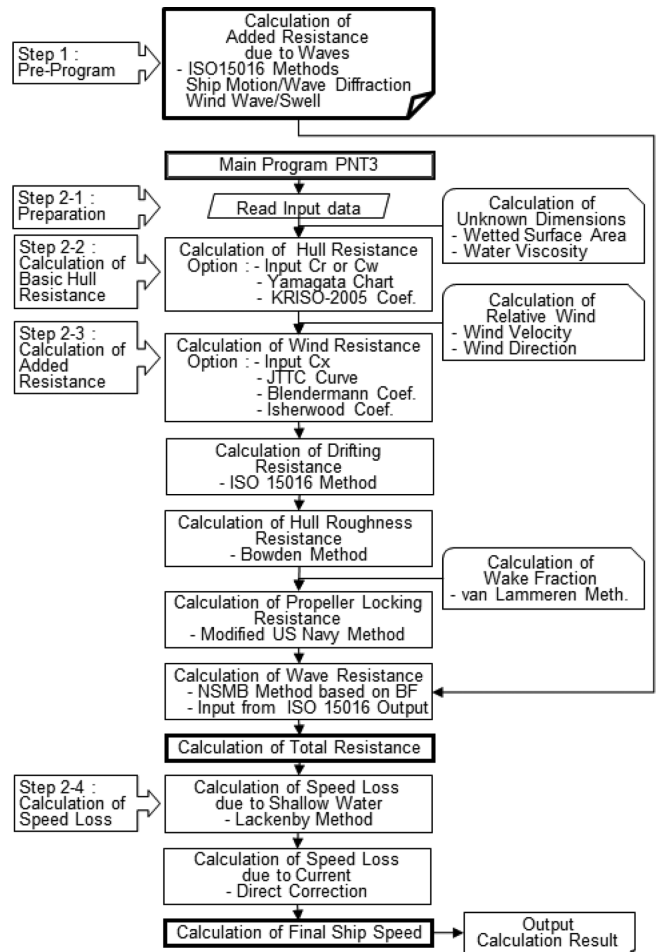
Table 1에서 비교되고 있는 파랑중 부가저항을 보면, 본 프로그램의 계산 결과와 ISO 15016:2002 예제 계산 결과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 본 프로그램의 계산 결과가 ISO 15016:2002 예제 계산 결과보다 평균 27kN 더 큰 것으로 나타났다. 그 차이는 비록 비율로 보면 큰 차이를 보인다고 볼 수 있으나, 부가저항이 큰 경우에는 그 차이의 비율이 줄어들어서, 값으로 본다면 차이가 크지 않다고 할 수 있다.

이 차이는 이론 계산 시 세부적인 계산 방법이 서로 다를 수 있다는 점과, ISO 15016:2002 표준에는 선형 오프셋이 명시되지 않아서 임의의 유사선에 대한 오프셋을 사용한 점 등에 기인한다고 판단된다. 그러나 ISO 15016:2002 예제 계산 결과에는 선체운동과 반사파 영향의 구분이나, 풍파와 너울의 구분이 없이 파랑중 부가저항 전체 값만 기재되어 있으므로, 이러한 차이에 대한 정확한 원인을 찾기는 어려운 상황이다.

실해역의 파랑중 부가저항을 추정하는 데에는 선박 상태에 대한 불확실성과 해상상태에 대한 불확실성 등에 의해 정확한 추정이 어려운 점을 고려하면, 이러한 정도의 차이는 받아들일 수 있는 것으로 보이며, 나아가 본 프로그램은 사용하기에 적절한 것으로 판단된다.

**4. 사고선박 저항 추정 프로그램에의 적용**

파랑중 부가저항 계산 프로그램 PNT3-WAVES의 계산 결과는 Fig. 2와 같은 표의 값으로 얻어지는데, 그 결과를 사고선박 저항 추정 프로그램에 적용하여 사고선박의 전체 저항을 추정하도록 하는 프로그램 PNT3-MAIN에 적용하도록 하였다. 사고선박 저항추정 프로그램 PNT3-MAIN의 흐름도는 Fig. 3과 같다.



**Fig. 3.** Flowchart of the Program for Calculation of Total Resistance of a Disabled Ship (PNT3-MAIN).

Fig. 4는 이 프로그램을 이용하여 임의의 해상상태에서 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에 예제로 제시된 30만톤급 유조선을 예인하는 경우의 저항 추정 결과를 보여주고 있다.

**5. 결 론**

본 논문을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다. 최근 가장 신뢰할 수 있는 이론계산 방법인 ISO 15016 속력시운전 표준 해석법을 이용하여 피예인선의 파랑중 부가저항을 추정

POWERING PERFORMANCE PREDICTION [PNT3]									
02-MAR-16									
FILE NAME: ISO300W.EUN									
SHIP NAME: ISO 300K	LOAD: FULL LOAD	LBL (M): 325.000	CB: 0.8100						
SCALE: 15.0000	TF (M): 20.800	S (M2): 27512.6	CM: 0.9972						
LPP (M): 320.000	TA (M): 20.800	SBK (M2): 180.0	CP: 0.9900						
B (M): 58.000	TMEAN (M): 20.800	DISV (M3): 312737.0	CP: 0.8123						
		LCB(%) (FWD): 0.0000							
		HULL ROUGH (M): 0.000250	(STANDARD: 0.000150)						
PROPELLER	NOPROP: 1	PROPELLER LOCK: 1.00	(LOCK: 1.0, FREE: 0.0)						
	DIA (M): 9.500	PROJECTED A.R.: 0.400							
WATER CONDITION	TEMP (C): 15.00	DENSITY (KG/M3): 1025.87	K.VIS. (M2/S): 1.1873E-6						
SEA CONDITION	BEAUFORT (BF): -1	AIR DENSITY (KG/M3): 1.22							
		CURRENT (KNOT): 0.80	SEA DEPTH (M): 60.00						
WIND CONDITION	SPEED (M/S): 4.50	DRIFT ANGLE (DEG): 5.0							
		DIRECTION (D. PORT): 25.0	AL (M2): 1100.0						
DAMAGED CONDITION	D.AREA (M2): 4.0		AT (M2): 3900.0						
SHIP SPEED	VK (KNOT): 3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	10.000	12.000	
FROUDE NUMBER	FN	0.0364	0.0456	0.0547	0.0638	0.0729	0.0911	0.1093	
EFFECTIVE POWER	PE (PS): 173.5	400.7	767.5	1305.6	2046.4	3020.8	5793.2	10046.7	
RESIDUAL RES. C. CR (E-3)	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.982	
BASIC RES. C. CTS (E-3)	2.460	2.397	2.350	2.314	2.284	2.258	2.218	2.226	
BASIC RESIST.	RITS (KN): 82.7	143.2	219.4	311.0	417.9	539.7	828.1	1196.7	
WIND RESIST.	DELWIN (KN): 22.2	25.5	29.2	33.0	37.2	41.6	51.3	62.2	
REL. W. SPEED	WSR (M/S): 5.935	6.424	6.917	7.413	7.911	8.411	9.416	10.426	
REL. W. DIRECT.	WDR (DEG): 18.69	17.22	15.96	14.87	13.91	13.07	11.65	10.51	
DRIFTING R.	DELDR (KN): 6.3	11.2	17.6	25.3	34.4	44.9	70.2	101.1	
H. ROUGH R.	DELHUL (KN): 5.1	9.0	14.1	20.3	27.7	36.1	56.5	81.3	
PROPELLER R.	DELPRO (KN): 18.3	32.5	50.7	73.1	99.4	129.9	203.0	292.3	
DAMAGED H. R.	DELDAM (KN): 6.4	11.5	17.9	25.6	35.1	45.8	71.6	103.1	
SEA STATE R.	DELSEA (KN): 40.3	43.8	47.3	50.8	54.2	57.7	64.5	71.3	
TOTAL RESIST.	RIT (KN): 181.2	276.7	396.2	539.3	705.8	895.8	1345.1	1908.0	
SHALLOW W.	DELDEP (KNOT): 0.106	0.141	0.176	0.212	0.247	0.282	0.353	0.424	
CURRENT	DELCUR (KNOT): 0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	
TOTAL SPEED	VKT (KNOT): 2.094	3.059	4.024	4.988	5.953	6.918	8.847	10.776	
BASIC ANALYSIS METHOD									
MODEL-SHIP CORR. LINE: 1957-ITTC									
2-DIMENSIONAL METHOD									
CORREL. ALLOWANCE(2-D): CA=-0.000200									
PREDICTION METHOD									
RESISTANCE PREDICTION : VA : MODIFIED YAMAGATA [JKSNA NO.177]									
WETTED SURFACE AREA : TO : TODD'S FORMULA									
EFFECT OF DRIFTING : 1 : SR208 METHOD									
EFFECT OF HULL ROUGHNESS : 1 : ITTC METHOD									
EFFECT OF PROPELLER LOCK : 1 : US NAVY METHOD USING WAKE= 0.368									
EFFECT OF DAMAGED HULL : 1 : EMPIRICAL METHOD									
EFFECT OF WAVE AND SWELL : 2 : ISO15016 METHOD									
EFFECT OF SHALLOW WATER : 1 : LACKENBY METHOD									
WIND RESISTANCE COEFF. : .807 : TANKER, LOADED FROM BLENDERMANN CHART									

Fig. 4. An Example Output from the Program of Resistance Prediction (PNT3-MAIN).

하는 알고리즘을 정립하고 이를 전산 프로그램(PNT3-WAVES)으로 구현하였다. 파랑중 부가저항은 선체운동에 의한 부가저항과 반사파에 의한 부가저항을 모두 계산하도록 하였으며, 파랑 또한 그 성분을 풍파와 너울로 나누어 각각 계산하도록 하였다. 이렇게 완성된 프로그램의 결과에 대해 ISO 15016:2002 속력시운전 표준 해석법에 수록된 예제 계산결과와 비교하여, 본 프로그램의 결과가 적절한 값을 보여줌을 확인하였다. 파랑중 부가저항 계산 프로그램(PNT3-WAVES)의 계산 결과는 선체 자체의 기본저항과 각종 부가저항을 총망라하는 전체 저항 추정 프로그램 PNT3-MAIN에 적용 되도록 하였다. 이들 프로그램은 실제의 사고 선박 예인력 추정 시 사용하기에 적절한 것으로 판단되었다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 주요사업으로 수행하고 있는 “해양사고 초기대응 및 구난기술 지원 시스템 개발 (PES2230)” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

## 기 호

$C(m)$  : Symmetric Kochin Function ( $m^2/sec$ )  
 $d$  : Draft ( $m$ )

$f$  : Frequency of the Elementary Incident Wave (1/sec)  
 $G$  : Direction Distribution of Incidence Waves  
 $g$  : Acceleration due to Gravity ( $m/sec^2$ )  
 $I_1, K_1$  : Modified Bessel Function  
 $k$  : Wave Number ( $K_0 = w^2/g$ ) (1/m)  
 $k_0$  : Wave Number ( $K_0 = g/V_s^2$ ) (1/m)  
 $l$  : Coordinate along Waterline ( $m$ )  
 $S$  : Frequency Distribution of Incident Waves ( $m^2/sec$ )  
 $S(m)$  : Asymmetric Kochin Function ( $m^2/sec$ )  
 $V_s$  : Ship Speed ( $m/sec$ )  
 $X$  : Wave Incidence Angle (rad)  
 $x$  : Coordinate of x-axis ( $m$ )  
 $y$  : Coordinate of y-axis ( $m$ )  
 $\alpha$  : Direction of the Elementary Incident Wave (rad)  
 $\alpha_1$  : Draught Influence Factor  
 $\Delta/\zeta_A^2$  : Response Function of Resistance Increase in Regular Waves ( $N/m^2$ )  
 $\zeta_A$  : Amplitude of Regular Waves  
 $\theta$  : Angle between Water-Line Tangent and Body Axis (rad)  
 $\rho$  : Density of Sea Water ( $kg\ sec^2/m^4$ )  
 $\omega$  : Circular Frequency (rad/sec)  
 $\omega_e$  : Circular Frequency of Encounter (rad/sec)

## 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, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 15, No. 2, 150-155.
- [2] Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N. and Skjoldal, S.O., 1980, Prediction of resistance and propulsion of a ship in a sea-way, Proceedings 13th ONR, 505-529.
- [3] IMO, 2009, Interim guidelines for Voluntary Verification of the Energy Efficiency Design Index, MEPC.1/Circ.682, Annex, 5.
- [4] IMO, 2013, Guidelines on Survey and Certification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI), MEPC.1/Circ.816, Annex, 6-7.
- [5] ISO, 2002, Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, International Standard ISO 15016:2002, 31-37.
- [6] ISO, 2015, Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data, International Standard ISO 15016:2015, 48-60.
- [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, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 16, No. 3, 211-216.
- [8] Kim, E.C., Choi, H.J. and Lee, S.G., 2014, A Study on the Simplified Prediction Method of Air Resistance for Towing Force

Calculation of Disabled Ships, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 17, No. 3, 198-204.

- [9] Kim, E.-C., et al, 2001, Evaluation and Computer Program on the Speed Trial Analysis Method of the Ongoing Work in ISO/TC8, Proceedings of the Eighth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Shanghai, China, 525-532.
- [10] Maruo, H., 1960, On the increase of the resistance of a ship in

rough seas (2nd report), Journal of Zosen Kiokai, No. 108, 5-13.

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

---

Received 16 March 2016

Revised 11 April 2016

Accepted 15 April 2016