Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 18, No. 6, pp. 597-603, December 31, 2012 (pISSN 1229-3431 / eISSN 2287-3341) http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.6.597

# 예선의 정수중 및 파랑중 저항성능 특성에 관한 연구

박종수* · 이상민**†
*, ** 군산대학교 해양생산학과

# Characteristics of Resistance Performance on Tugboat in Still Water and Waves

Jong-Su Park* · Sang-Min Lee**†
*, ** Dept. of Marine Science and Production, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

**요 약** : 해상에서의 안전한 예인 업무를 수행하기 위해서는 정확한 예인력의 추정이 필요하며, 이를 위해서는 예선의 저항성능 특성에 대하여 정확히 파악해 두어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 먼저 정수중 예선 주위의 유동 특성 및 예선의 저항추진 성능을 파악하고자 회류수조에서 예선 모형을 이용하여 실험을 실시하였다. 모형실험은 무한수심 조건에서의 1/33.75 축척으로 제작된 예선 모형을 이용하였으며, 설계속도를 7노트로 선정하고 역조와 순조의 조류 영향을 고려하여 5~10노트의 속도 구간에서 각 속도별로 실행하였다. 또한 파랑에 의한 예선의 운동응답 함수와 부가저항을 추정하기 위하여 수치계산을 실행하였으며, 이에 대한 결과를 정수중에서의 실험을 통하여 얻게 된 데이터와 비교하였다. 이와 같은 해석 결과 파랑중 부가저항은 선수파 및 속도가 높아질수록 증가하며, 유효마력은 정수중에 비하여 70 % 정도 증가하고 있는 현상을 확인할 수 있었다.

**핵심용어 :** 예선, 저항성능, 모형실험, 부가저항, 수치계산

**Abstract :** *It is necessary to accurately evaluate the resistance performance and estimate the towing power of a tugboat for safety towing operation at actual seas. In this study, we have carried out the model tests firstly to investigate the resistance performance and flow characteristics around the tugboat in still water. The experiments are performed in infinite depth in circulation tank using 1/33.75 scaled model from 5kts to 10kts(designed speed 7kts) considering the effect of adverse and favorable current. Then the numerical calculations are executed to analyze the response amplitude operator and added resistance on tugboat due to the waves. The results obtained by the present computation are compared with the those acquired from the experiments in still water. As a result, it is noted that the added resistance become larger at head sea and higher speed conditions. We can also observe that the EHP increase 70 percent in comparison with those in still water.*

**Key Words :** *Tugboat, Resistance performance, Model test, Added resistance, Numerical calculation*

## 1. 서 론

예선은 부선의 예인, 대형선의 입출항 보조, 방제활동 등 다양한 해상업무분야에서 활용되고 있다. 여러 예선의 업무 중에서 부선을 선미에서 예인하는 선미예인의 경우 파랑이 있는 실제 해역을 항행하기 위해서는 예인작업과 관련하여 사전에 충분한 주의와 준비가 필요하다. 안전한 예인업무를 수행하기 위해서는 정확한 예인력의 추정이 필요하며 이를 위해서는 예선의 저항성능 특성에 대하여 파악하고 있어야 한다.

일반적으로 선박 저항성능의 추정이라고 하는 것은 주로 정수중에서의 모형실험을 통한 실선의 유효마력을 추정하는 과정을 말한다. 그러나 실제 해상에서는 파랑 등에 의한 부가저항이 발생하게 되며 이에 대한 추가적인 고려를 이행하여야 보다 정확한 실해역에서의 저항성능을 추산 할 수가 있다.

기존에 발표된 연구로서 유의파고에 의해 일률적으로 부가저항을 적용하여 부선의 전저항 계산식을 구하고 이것에 의해 예인삭의 절단하중을 추정하는 등 국내외 예부선 운항 안전과 관련된 연구가 수행되었다(Im et al., 2006). 부가저항과 관련된 연구로서는 추파중 계산 정밀도를 높이기 위해 근사계산법을 적용한 연구(Takagi, 1991), Wigley 모델을 이용한 선체운동의 계산과 이 결과가 저항증가에 미치는 영향에 대한 연구(Kashiwagi et al., 2000)가 실행되었으

* First Author : jspark@kunsan.ac.kr, 063-469-1817
† Corresponding Author : smlee@kunsan.ac.kr, 063-469-1814

며, 방사부가저항을 계산하기 위하여 S175 선박을 대상으로 Maruo 공식을 활용한 연구(Hong et al., 2001), 벌크선의 밸러스트 상태와 같은 적재 조건의 변화가 저항증가에 미치는 영향에 대한 연구(Ichinose et al., 2010)와 부선에 영향을 미치는 파랑중 저항증가에 관한 연구(Ahn and Lee, 2010) 등이 있다. 컨테이너 선박과 벌크선과 같은 일반적인 상선 선형에 대한 부가저항에 관한 연구와 선수형상이 서로 다른 부선에 작용하는 저항증가에 관한 연구는 이미 수행되었거나 진행중이지만 특수 작업에 자주 이용되는 예선의 부가저항 특성에 대하여 연구한 결과는 현재까지 발표되지 않았다. 따라서 파랑중 뿐만 아니라 정수중에서의 저항성능을 함께 조사 및 분석하는 과정을 통하여 실제 해역에서 예선에 작용하는 전저항을 파악하고 이에 필요한 유효마력을 추정함으로서 예선의 예인 마력을 추산하는데 있어서 객관적으로 판단할 수 있는 정보를 제공하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는 먼저 정수중 예선 주위의 유동 특성 및 예선의 저항추진 성능을 파악하고자 회류수조에서 예선 모형을 이용하여 실험을 실시하였다. 예선에 미치는 저항과 실선의 유효마력 및 선측 파형의 관측 등을 위하여 각각의 속도에 대하여 실험을 실시하였으며, 이를 토대로 예선의 정수중 저항성능과 선체주위의 유동장 특성에 대한 분석을 실시하였다. 또한 파랑에 의한 예선의 운동응답 함수와 저항증가를 추정하기 위하여 수치계산을 실행하였으며, 이에 대한 결과를 정수중에서의 데이터와 함께 분석함으로써 실제의 해상에서 예선의 예인 능력에 영향을 미치는 예선의 전저항과 유효마력 등의 추정을 통하여 예선의 저항추진 성능에 대한 종합적인 평가 및 논의를 이행하였다.

## 2. 정수중 저항성능

### 2.1 수조실험

정수중 예선의 저항성능과 유동 특성 등을 파악하기 위하여 예선의 모형선을 이용하여 회류수조에서 모형선에 작용하는 저항 측정과 선측 파형 등을 관측하였다. 실선의 설계속도를 7노트로 선정하고 역조와 순조의 조류 영향을 고려하여 5노트 ~ 10노트에 해당하는 속도 범위의 무한수심 조건하에서 각 속도별로 실험을 실시하였다. 10.0 m × 1.5 m × 4.0 m (L × B × D) 크기의 회류수조에서 400톤급 예선을 1/3.75 축척으로 제작한 예선 모델을 실험 대상으로 선정하였으며 각 선속별 저항 값을 측정하여 이에 대한 결과를 상호 비교 및 분석하였다. 본 연구에서 활용한 실제 예선과 모형선에 대한 상세한 제원 및 형상은 Table 1과 Fig. 1에 나타내고 있다.

Table 1. Main particulars for tugboat

| Parameters | Full load condition | |
|---|---|---|
| | Actual | Model |
| Loa (m) | 30.0 | 0.8889 |
| Lbp (m) | 27.0 | 0.8000 |
| B (m) | 8.8 | 0.2607 |
| D (m) | 4.0 | 0.1185 |
| d (m) | 2.9 | 0.0859 |
| Cb | 0.5864 | |
| Wet. S ($m^2$) | 323.3 | 0.28384 |
| Displacement ($m^3$) | 409.3 | 0.01065 |

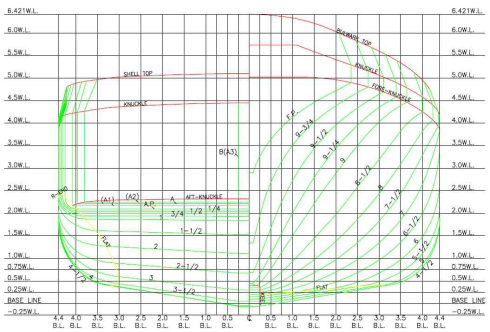

Fig. 1. Body plan of tugboat.

### 2.2 실험 결과 및 고찰

예선의 추진성능에 영향을 미치는 정수중 저항성능 특성을 조사하기 위하여 수조 실험을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 2에는 모형선에 작용하는 전저항 계측 값, Fig. 3에는 모형선의 전저항 계수, Fig. 4에는 모형선의 잉여저항 계수를 나타내었다. 또한 Fig. 5에는 실선의 전저항 값, Fig. 6에는 실선의 유효마력 값을 표시하고 있다. 본 연구에서 사용한 실선의 저항 추정법은 ITTC-1957 실선모델 상관관계를 채택하여 해석하였다.

Fig. 3의 예선 모형선에 대한 전저항 계수(Ctm)를 살펴보면 선미 예인시 일반적으로 많이 적용되고 있는 설계속도인 7노트(0.629 m/s)에서 가장 작은 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 모형선의 전저항 계수는 0.805 m/s(실선의 9노트에 해당)에서 가장 높은 값을 보이고 있으며 실선의 유효마력은 7노트에 비하여 151 % 증가하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 6). 따라서 선속을 증속할 경우 유효마력이 대폭 증가하고 있다는 상황을 정확히 파악하여 안전한 예선 운항 업무에 활용해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 보여지는 잉여저항 계수는 저속보다는 설계

속도 이후 고속으로 될수록 전저항 계수와 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, 저속일때에 전저항에 가장 크게 영향을 미치는 저항은 마찰저항 성분이지만, 고속으로 될수록 마찰저항 성분보다는 조파저항과 조와저항에 의한 영향을 많이 받고 있다는 것을 알 수 있다.

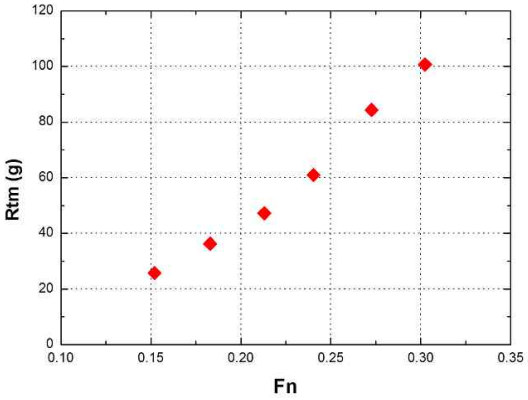


Fig. 2. Measured total resistance on model.

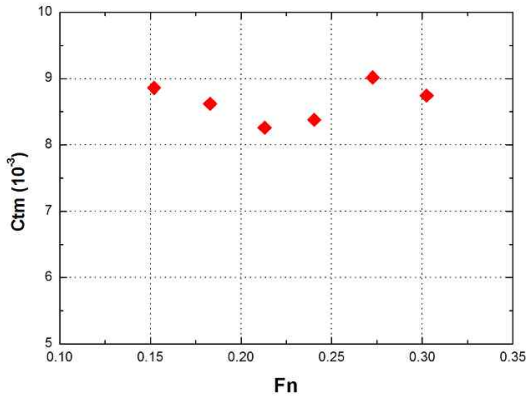


Fig. 3. Total resistance coefficient of model.

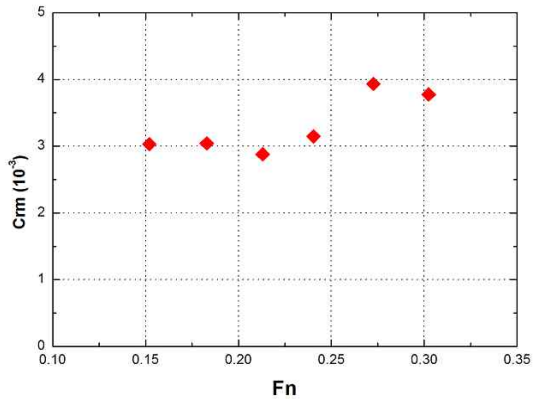


Fig. 4. Residual resistance coefficient of model.

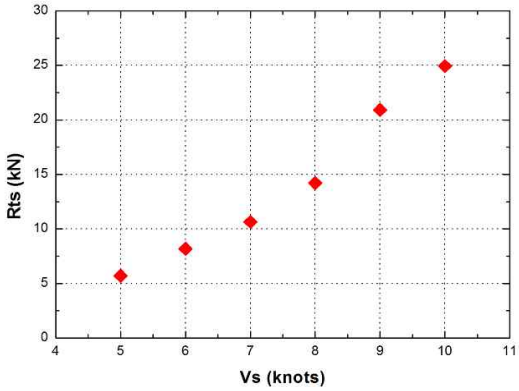


Fig. 5. Total resistance on tugboat.

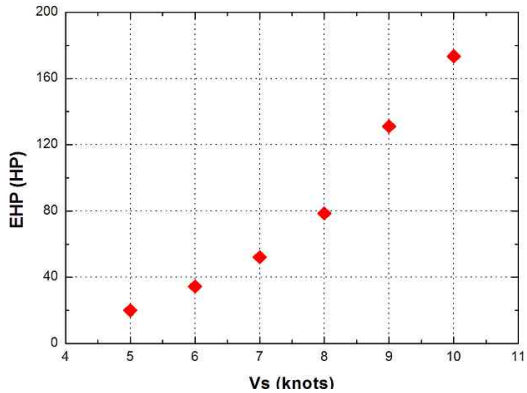


Fig. 6. EHP of tugboat.

실선에 작용하는 전저항과 실선의 유효마력은 Fig. 5와 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 9노트 이후에 급속히 증가하고 있는 모습을 나타내고 있다. 실제로 부선이나 타 선박을 예인하는 작업을 하고 있거나 예선 단독 운항을 할 경우에 최적의 경제 운항 속력을 파악하고 있어야만 효율적인 예선 업무를 수행할 수 있을 것이라고 판단되어 진다.

Fig. 7은 예선의 설계속도인 7노트일 경우의 선체 주위 파형 모습을 나타내고 있으며, Fig. 8은 전저항 계수가 급격히 높아지는 실선의 9노트에 해당하는 선속에서의 예선 모형선 주위에 발생하고 있는 선측 파형을 보여주고 있다. 선속이 7노트와 9노트일 경우를 상호 비교해 보면, 특히 예선의 선수 부근에서 7노트에 비해서 9노트인 경우 파가 크게 발생하여 전파되고 있는 모습을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 9노트 이후 잉여저항 계수를 급속히 증가시켜 전저항이 증가되도록 하는 원인이라고 추정된다. 전체적으로는 선수쪽보다 선미쪽에서 발생하고 있는 선미파가 크게 형성되어 전파되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이렇게 선미에서 발산되는 선미파는 부선 등을 근거리에서 예인하고 있을 경우 예인되고 있는 선박에 또다른 저항 증가의 원인중 하나로 작용할 것이라고 추정된다.

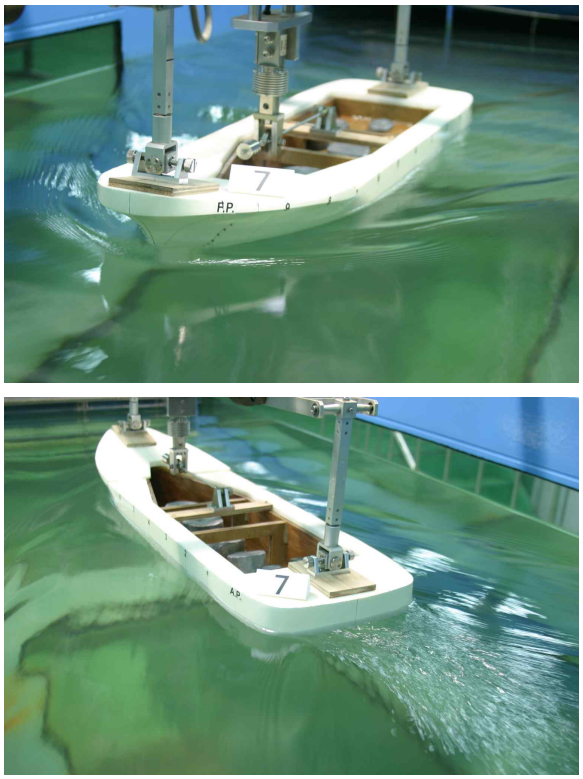

Fig. 7. Wave pattern for tugboat (Vs=7kts).

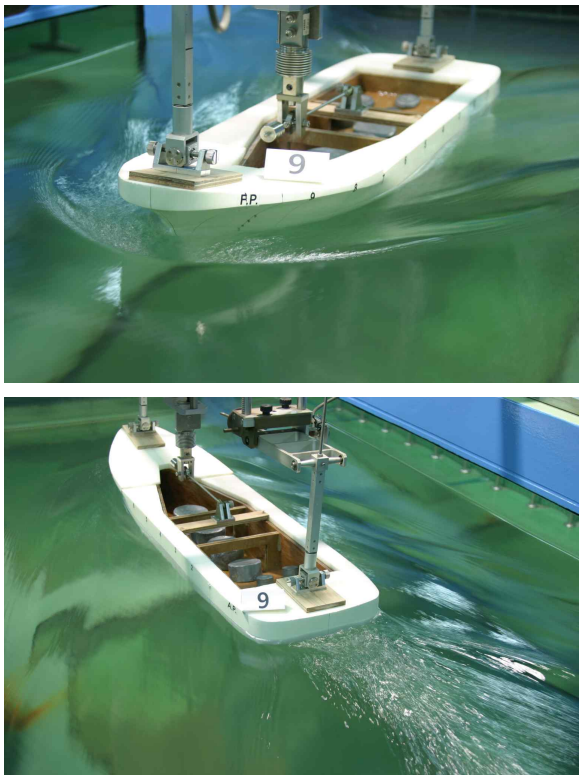

Fig. 8. Wave pattern for tugboat (Vs=9kts).

## 3. 파랑중 저항증가

### 3.1 수치계산

선박이 파랑중을 항행할 경우에 선체의 동요에 의해 발생하는 파와 선체에 입사파가 부딪혀 반사되어 발생하는 파로 인하여 저항이 증가하게 된다. 본 연구에서는 정수중에 비해 파랑으로 인하여 증가하는 부가저항의 특성을 비교 및 검토하기 위하여 수치계산을 실시하였다. 수치계산을 위하여 사용한 선박은 전장 30미터의 예선으로 Table 1에 모형선 제원과 함께 실선의 제원을 보이고 있다.

파랑에 의한 선박의 저항 증가에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 작용하는 Heave와 Pitch 운동과 같은 선박의 종운동을 계산하기 위하여 NSM(New Strip Method)을 이용하여 운동응답함수를 구하게 되며, 파랑중의 저항 증가 계산은 Maruo 등에 의한 계산법(Maruo and Iwase, 1980)을 토대로 한 Takagi의 근사 계산법(Takagi, 1991)을 적용하였으며 계산식은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta R = 4\pi\rho\left[-\int_{-\infty}^{-K_1} + \int_{K_3}^{\infty}\right]\frac{(m-K\cos\chi)}{\sqrt{1-K_3^2/m^2}}|H(m)|^2 dm + 4\pi\rho\int_{-K_2}^{K_4}\frac{(m-K\cos\chi)}{\sqrt{1-m^2/K_0^2\tau^4}}|H(m)|^2 dm \quad (1)$$

$$|H(m)|^2 = |H_1(m)|^2 + \frac{(m+K_0\tau)^4 - K_0^2 m^2}{K_0^2}|H_2(m)|^2 \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2}K_0(1+2\tau \pm \sqrt{1+4\tau}) \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} K_3 \\ K_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2}K_0(1-2\tau \pm \sqrt{1-4\tau}) \quad (4)$$

여기서 $H_n(m)$은 Kochin 함수, $K_0 = \frac{g}{U^2}$, $\tau = \frac{U\omega_e}{g}$, $U$는 선속, $\omega_e$는 만남파 주파수, $\chi$는 입사각을 의미한다.

본 수치계산법을 이용하여 Wigley 선형을 대상으로 실험결과와 비교·분석한 연구(Ahn and Lee, 2010)가 실행되었으며, 비교 결과 단파장 영역에서는 수치계산 값이 실험값보다 작은 값을 보여주고 있으나 전반적으로는 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내고 있는 것이 확인 되었다. 본 연구에서는 위와 같은 계산법을 예선에 적용하여 파랑중 부가저항 특성을 파악하고자 하였다.

### 3.2 계산 결과

예선의 Heave 및 Pitch에 대한 선속별 무차원화된 운동

응답 값을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내고 있다. 만남각은 180°, 즉 정선수파를 기준으로 했으며 선속이 증가할수록 Heave 및 Pitch 운동 응답이 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 예선의 종운동의 영향으로 Fig. 11에 보여지는 것과 같이 파랑중 부가저항은 선속의 영향을 많이 받으며 선속이 높아질수록 부가저항이 증가하고 있는 모습을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향은 타 연구에서도(Lee et al., 2010) 확인되었으며, 부가저항을 구성하는 요소중 선체에 대한 파의 반사에 의한 직접적 영향은 비교적 작고 선체의 동요에 의해 발생하는 파에 의한 저항증가 성분이 비교적 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 파도와의 만남각별 부가저항의 특성을 분석하기 위하여 부가저항을 정선수파(180°)로부터 정횡쪽으로 30° 간격으로 나누어 선수로부터 60°까지의 만남각에 대하여 상호 비교하고 있다. 선속은 설계속도인 7노트를 기준으로 실행한 계산 결과를 보여주고 있다.

파랑중 저항의 증가는 정선수파에서 가장 큰 값을 보여주고 있으며 파도와의 만남각이 정횡쪽으로 갈수록 부가저항이 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 설계속도 7노트에서의 정수중 실선의 전저항 값과 유의파 진폭 1미터의 정선수파를 만났을 경우의 부가저항 값을 나타내고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 파랑에 의해 증가하는 부가저항은 정수중 전저항의 70 % 정도를 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13의 전저항 값을 토대로 실제 예선에서 필요로 하는 유효마력을 산출한 결과는 Fig. 14에 나타내고 있다. 파랑중 부가저항에 의해 발생하는 유효마력은 전저항과 마찬가지로 정수중에 비하여 70 % 정도 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

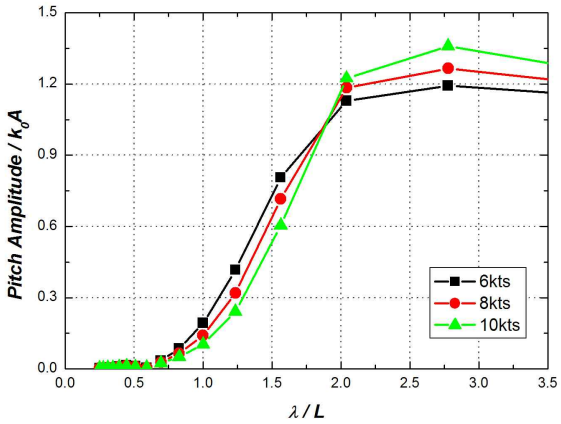


Fig. 10. Pitch motion of tugboat ($\chi$=180°).

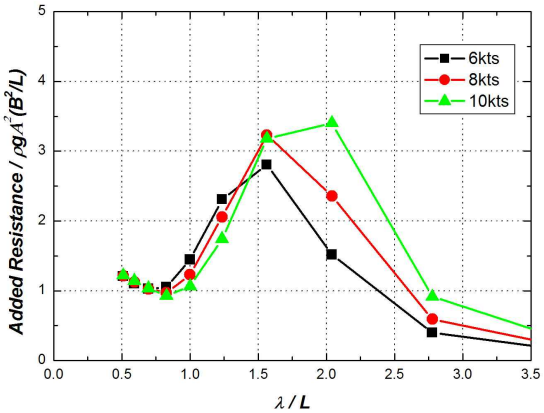


Fig. 11. Added resistance on tugboat ($\chi$=180°).

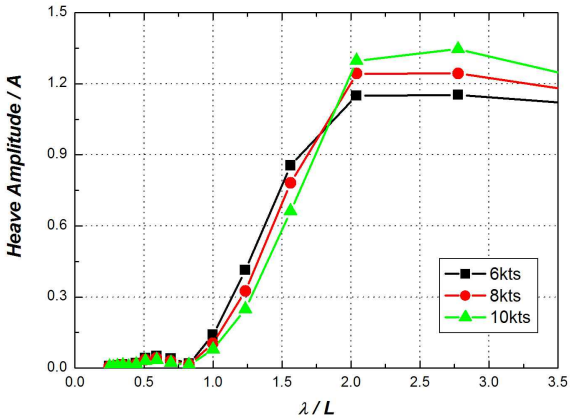


Fig. 9. Heave motion of tugboat ($\chi$=180°).

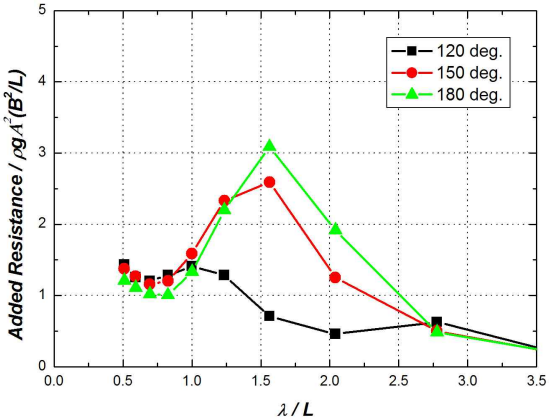


Fig. 12. Added resistance on tugboat (Vs=7kts).

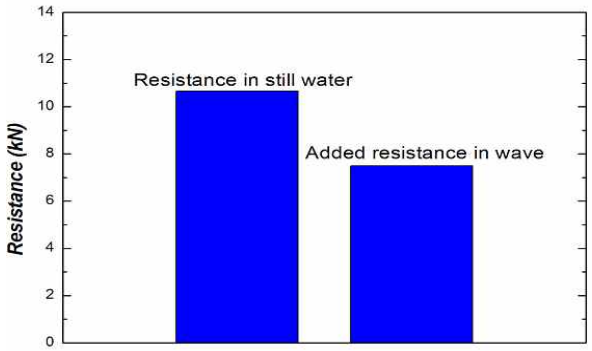


Fig. 13. Comparison of resistance on tugboat ($\chi$=180°, Vs=7kts).

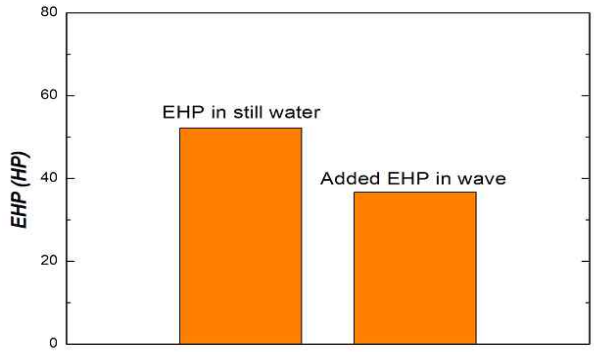


Fig. 14. Comparison of EHP ($\chi$=180°, Vs=7kts).

## 4. 결 론

본 연구에서는 정수중 및 파랑중에서의 예선에 작용하는 저항성능 특성을 파악하기 위하여 회류수조에서의 실험 및 수치계산을 수행하였다. 정수중에서의 예선의 저항성능 추정과 선측파형을 관측하기 위하여 1/33.75의 크기로 제작된 모형선을 이용하여 수조실험을 실시하였다. 수조실험 결과 설계 속도보다 증속할 경우 유효마력이 최대 151%까지 증대되는 속도 구간이 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있었으며, 고속으로 될수록 마찰저항 성분보다는 조파저항과 조와저항에 의한 영향을 많이 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

또한 파랑에 의한 부가저항 특성을 조사하기 위하여 수치계산을 실행하였다. 계산 결과 속도가 높아질수록 종운동 응답 값이 증가하여 부가저항도 함께 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 정선수에서 파도를 만날 때 부가저항은 가장 큰 값을 나타내고 있음을 확인 하였다. 이와 같은 파랑중 부가저항과 유효마력은 정수중에 비하여 최대 약 70%나 증가하고 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 부선과 같은 타선박을 선미에서 예인하는 작업 등에 예선이 사용될 경우 파랑에 의한 부가저항이 발생하고 이로 인한 유효마력이 상당히 증가하고 있음을 사전에 숙지하고 있어야 한다. 또한 파랑에 의해 예선에 작용하는 부가저항 못지않게 부선의 경우에도 부가저항이 크게 작용하고 있으므로 여유 마력을 충분히 고려하여 안전예항 업무를 수행해야 할 것으로 판단된다.

향후에는 파랑과 바람이 있는 실제 해역에서의 선미예인과 같은 상황에서 예선이 필요로 하는 총합적인 예인마력을 정확히 추정하기 위한 연구가 필요하며, 이를 위해 예선과 부선을 대상으로 조파수조에서의 수조실험과 풍동실험 및 수치 시뮬레이션 등에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 2011학년도 군산대학교 연구교수 경비의 지원에 의하여 수행되었음.

## 참 고 문 헌

[1] Ahn, B. K. and S. M. Lee(2010), Study on the Added Resistance of Barge in Waves, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 10, pp. 741-746.

[2] Hong, D. C., S. Y. Hong and E. C. Kim(2001), On the Calculation of Added Resistance of a Ship by Maruo's Formula, Proceeding of the Spring Conference of the Korean Society of Ocean Engineers, pp. 202-207.

[3] Ichinose, Y., M. Tsujimoto, N. Sogihara, K. Shibata and K. Takagi(2010), Estimation of Added Resistance in Waves in a Ballasted Condition, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 11, pp. 109-116.

[4] Im, N. K., S. H. Park and G. K. Park(2006), A Study on the Present Status of Safety in Tug-Barge Transportation, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 12, No. 1, pp. 61-66.

[5] Kashiwagi, M., K. Kawasoe and M. Inada(2000), A Study on Ship Motion and Added Resistance in Waves, Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan, No. 234, pp. 85-94.

[6] Lee, J. H., H. Kawabe, B. W. Kim and M. K. Ha(2010), Comparison Calculation of the Added Resistance According to Trim Change of Ship with Forward Speed, Proceeding of the Spring Conference of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 1086-1091.

[7] Maruo, H. and K. Iwase(1980), Calculation of Added Resistance in Oblique Waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 147, pp. 79-84.

[8] Takagi, K.(1991), Simplified Formulas for the Calculation of Added Resistance, Steady Lateral Force and Turning Moment in Waves, Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan, No. 216, pp. 121-128.

원고접수일 : 2012년 11월 13일
원고수정일 : 2012년 12월 17일
게재확정일 : 2012년 12월 27일