

# 공기윤활시스템 적용 선박의 시운전 속도성능에 대한 불확실성 해석

서대원\* · † 오정근

\*,† 군산대학교 조선해양공학과 교수

## Uncertainty Analysis of Improved Speed Performance of a Ship with an Air-Lubrication System in a Sea Trial

Dae-Won Seo\* · † Jungkeun Oh

\*,† Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University, Korea

**요 약** : 선박의 해상 시운전 중 속도성능시험은 선박의 속도를 입증하기 위한 중요한 시험항목 중 하나이다. 국제표준화기구에서는 2015년 시운전 속도성능시험에 관한 표준 가이드라인을 제정한 바 있다. 일반적인 해상상태에서는 바람과 파도 등 환경적 외란의 영향이 언제나 존재하므로, 정확한 전달동력을 추정하기란 불가능 하다. 또한 외란의 영향으로 최근 개발되고 있는 에너지 절감장치의 개선효과를 정확히 평가하는 것도 쉽지 않다. 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 공기윤활시스템을 장착한 선박의 동력 절감량에 관한 불확실성 해석을 수행하였다. 그 결과 공기윤활시스템 가동으로 3.2%의 동력이 절감되었으며, 절감된 동력의 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k = 2$ )에서 약  $\pm 2.7\%$  범위를 갖는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 불확실성 해석, 공기윤활시스템, 몬테카를로 시뮬레이션, 시운전, 속도성능

**Abstract** : A sea trial of the speed performance test is the one of the most important means of verifying a ship's performance, and the International Organization for Standardization established a standard for this test in 2015. Environmental disturbances such as wind and waves are always present under real sea conditions, however, so it is impossible to accurately estimate delivered horsepower under ideal conditions. These disruptive influences also make it difficult to evaluate the positive effect of recently developed energy-saving devices. In this study, uncertainty analysis of improved speed performance was carried out using Monte Carlo simulation to confirm the energy-saving efficiency of a ship equipped with an air-lubrication system. The findings showed the average power saving to be 3.2%, with the expanded uncertainty of  $\pm 2.7\%$  at a 95% confidence level ( $k=2$ ).

**Key words** : uncertainty analysis, air-lubrication system, Monte Carlo simulation, sea trial, speed performance

### 1. 서 론

일반적으로 조선소에서 선박의 건조가 끝나면, 선박은 진수식을 가진 후에 선주에게 인도되기 전까지 다양한 시운전 시험을 수행하게 된다. 시운전은 크게 안벽에서의 계류 시운전과 해상 시운전으로 구분된다. 이러한 계류 시운전 및 해상 시운전은 선박 계약사항에 따라 선박이 건조되었는지를 선주 및 선급에게 확인시켜주는 업무이다.

선박의 속도 성능은 해당 환경조건인 바람, 파도 등에 따라 변화하게 된다. 따라서 선박의 해상 시운전은 이러한 외력이 존재하는 환경에서 수행되므로 계측된 결과를 모형시험조건과 동등한 잔잔한 해상(Calm weather)상태 값으로 보정해 주어야 한다. 외란보정을 위해서는 시운전 해역의 상태까지도 동시에 계측되어야 한다. 이러한 일련의 보정절차는 (ISO, 2015)에 상세히 언급되어 있다.

해상 시운전시 외란 계측 값들의 정확도 수준에 따라 속도 성능의 불확도가 결정된다. 선속-동력 결과의 불확실성을 낮추기 위한 방법으로는 더욱 정밀한 계측기를 사용하거나, 이상적인 시험환경(정수 중)에서 계측하는 것이 필요하다. 그러나 실제 해상에서 이뤄지는 속도 시운전의 경우, 이상적인 시험 환경조건에서 수행하기란 불가능하다. 따라서 모든 시운전 계측결과에는 계측 장비가 가지는 불확도와 시운전 환경조건에 기인하는 불확도가 모두 포함되어 있다고 할 수 있다 (Insel, 2008). 이러한 불확도의 크기가 커지면 계측결과와 신뢰도가 낮아지므로, 다양한 분야에서 이미 불확도 추정에 관한 많은 연구를 통해 불확도의 요인을 분석하여 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해 노력하고 있다.

국제시험수조협회(ITTC)에서는 저항시험, 프로펠러 단독 성능 시험 등 다양한 유체역학 실험뿐만 아니라 CFD 해석에 관한 불확실성 해석 절차 등도 개발한 바 있다(ITTC 2002,

† Corresponding author : 정희원, jkoh@kunsan.ac.kr 063)469-1857

\* 정희원, dwseo@kunsan.ac.kr 063)469-1858

2005). 이러한 불확실성 해석 절차를 바탕으로 Park et al.(2003), Han et al.(2017)은 저항 및 자항 모형실험에 대한 불확실성 해석을 수행한바 있으며, Park et al.(2012)은 운동 및 저항 수치 시뮬레이션에 대한 불확실성 해석을 수행한 바 있다. 이와 같이 대부분의 절차 및 불확실성 해석 연구 등은 주로 실험실 단위에서 수행되는 모형실험에 초점이 맞춰져 있다.

아직까지 실제 해상에서 측정되는 선속-동력 시운전에 관한 표준 불확실성 해석 절차는 없으며 관련 연구들도 상당히 저조한 편이다. 한편 Insel (2008)은 12척의 시리즈 선박의 시운전 결과를 바탕으로 선속-동력성능의 불확실성 해석을 수행하였으며, 이를 통해 불확실성에 영향을 주는 주요 인자 및 불확도 크기를 조사하였다. Aldous et al.(2015)는 선박 성능 모니터링 시스템을 설치하여 계속된 항차별 데이터를 바탕으로 선박 성능에 대한 불확도 요소를 조사한 바 있다.

본 연구에서는 마찰저항 저감을 위해서 적용된 공기유탄선박의 동력 절감효과와 더불어 동력 절감량에 대한 불확실성 해석을 수행하였다. 불확실성 해석에 사용된 측정 데이터는 시운전 속도성능 시 계속된 측 동력 값과 해양환경 외란(바람, 파도, 수온 등)의 측정값을 고려하였다. 동력 절감량에 대한 불확실성 해석을 통해 속도성능 시험에 사용된 측정시스템의 신뢰도라 할 수 있는 불확도의 크기 및 주요 불확도 요인에 의한 민감도 분석을 수행하였다.

## 2. 측정 불확실성 해석법

불확도 개념은 ISO 표준을 통해 개정되어 왔으며, 1984년 이전에는 측정값 혹은 측정량의 추정값이 가질 수 있는 오차의 한계로 정의되어 왔다. 그러나 여기서 오차는 측정값과 참값의 차이를 의미하므로, 실제 알 수 없는 값임에 따라 1992년 이후에는 불확도 개념을 측정값이 참값에 속해있는 범위를 나타내는 추정값으로 정의하고 있다. 즉 참값은 유일한 값이지만, 실제로는 알 수 없는 값으로 간주 할 수 있으므로, 측정값 혹은 측정량이 참값과 일치하는 정도를 나타내는 지표인 정확도를 하나의 값으로 표현 할 수 없다. 이에 따라 정확도를 표현하기 위해서 불확도와 함께 표현하는 것이 일반적이며, ISO 19030 표준에서는 선박의 성능에 대한 불확실성 해석방법을 세 가지로 정의하고 있으며, 각각의 방법은 다음과 같다(ISO, 2016).

### 2.1 불확도 전파법

ISO(2008a)에서 제시한 GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements) 방법은 불확도 전파법칙을 이용하는 특징을 가진다. 본 방법은 주요 불확도에 대한 인자들의 표준 불확도를 추정하고, 불확도 전파법칙에 따른 테일러 1차 급수를 적용하여, 합성 불확도를 산출하는 방법이다. 본 방법은 입력평균량에 비해 입력량의 표준불확도가 매우 작아

질 경우 계산상의 큰 오차가 발생할 가능성이 크다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 간단한 수계산이 가능하다는 장점이 있으며, 국제시험수조협회 (ITTC)에서 제안한 불확도 절차 등이 모두 본 방법을 따르고 있다. 그러나 본 방법은 수학적 모델이 선형이어야만 하고, 입력 자료가 반드시 가우시안 분포를 따라야 한다는 단점이 있어 본 연구에 적용하기는 힘들 것으로 판단하였다.

### 2.2 확률분포 전파법

두 번째 방법은 ISO GUM을 보완하는 방법 중 하나로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 불확도를 추정하는 것이다(ISO, 2008b). 본 방법은 불확도 전파법칙을 이용하는 방법과는 달리 입력 자료에 대한 확률분포 전파법칙을 이용한다는 특징을 갖는다. 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 모델식 및 입력자료 분포에 대한 제한이 없어 신뢰성 평가를 비롯한 다양한 분야에서 많이 활용되고 있으며, 본 연구에서도 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 적용하여 불확도를 추정하였다. 조선해양 분야에서는 선박의 손상에 대한 신뢰도 평가(Brown and Chen, 2002), 실선의 추진 성능해석(Coraddu et al., 2014; Insel, 2008)분야에서 몬테카를로 시뮬레이션이 사용되어 오고 있다.

### 2.3 해석적인 방법

마지막으로 해석적인 방법의 경우, 아무런 가정이 없어 정확한 불확도 평가가 가능하나, 매우 단순한 수학적 모델에서만 적용이 가능하므로 활용도가 낮다.

## 3. 시운전 시험 및 불확실성 요소

### 3.1 시운전 시험

대상선박은 Fig. 1과 같이 170K LNG선박으로, 약 한달 정도의 Re-docking 기간에 공기유탄시스템을 설치하고, 장비에 대한 성능 테스트 후 싱가포르 Sembawang 조선소 근해에서 시운전이 수행되었으며 자세한 정보는 Kim et al(2017)의 논문을 참고한다.

Kim et al.(2017)에 따르면, 공기유탄시스템 설치로 인한 개선효과를 평가하기 위해 발라스트 상태에서 3가지 MCR 조건의 왕복 시운전 속도시험이 수행되었다. 각 시험(run)에 대해서는 공기유탄시스템의 가동/ 비가동 조건에서 수행되었으며, 약 10분 동안 30초 평균 간격으로 측 동력 데이터 및 해양환경 데이터를 수집하고 이를 분석하여 선속 - 동력 성능을 추정하였다.



Fig. 1 170K Class LNG Carrier with air lubrication system (Kim et al., 2017)

### 3.1 시운전의 불확실성 요소

선박의 선속성능을 추정하기 위해서는 선박의 축 동력뿐만 아니라 파도, 바람, 수온등과 같은 환경적 데이터도 계측되어야 한다. 이러한 데이터를 계측함에 있어, ISO 15016(ISO, 2015)의 절차에서 각 항목별 허용 가능한 계측기를 언급하고 있다. 시운전을 통해 선박의 선속 성능을 추정하기 위해서는 상당히 많은 항목의 데이터가 계측되어야 한다. 이는 다시 말해 시운전 선속-동력 성능에 다양한 항목의 불확실성이 존재함을 의미하기도 한다.

### 3.2 축 동력 계측시스템의 불확도 요소

선박의 축 동력을 계측하기 위해서 엔진의 내부 실린더의 연소압력을 측정하거나 축에 스트레인 게이지를 부착하여 축 토크와 축 회전수를 계측하여 동력으로 환산하는 방법 등이 활용될 수 있다. 각 방법별로 장단점이 있을 수 있으나, 현재 까지 대부분의 속도 시운전에서는 축에 스트레인 게이지를 부착하여 토크와 축 회전수를 계측하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 경우 축 토크를 계측함에 있어서 발생하는 불확도 요소들과 축 회전수를 계측함에 있어서 발생 가능한 불확도 요소들로 나눌 수 있으며, 표준 불확도 산정을 통해 최종적인 축 동력 계측 시스템의 합성표준 불확도를 추정할 수 있다.

### 3.3 해양 환경 외란 계측 불확실성 요소

본 연구에서는 해양환경에 의한 외란의 영향을 보정하기 위해서 바람에 의한 부가저항, 파도에 의한 부가저항, 수온 및 밀도에 의한 보정을 수행하였으며, 시운전이 수행된 해역의 수심은 상당히 깊어 천수의 영향은 배제하였다.

바람에 의한 부가저항 보정은 식(1)를 통해 이뤄지며, 불확도 요소로는 계측된 상대풍속과 풍향이 가장 큰 요인으로 알려져 있다.

$$R_{AA} = 0.5\rho_A C_{AA}(\psi_{WRef}) A_{XV} V_{WRef}^2 - 0.5\rho_A C_{AA}(0) A_{XV} V_G^2 \quad (1)$$

여기서,  $R_{AA}$ 는 바람에 의한 부가저항,  $\psi_{WRef}$ ,  $V_{WRef}$  는 각각 상대풍향 및 상대풍속을 의미한다.  $C_{AA}$ 는 해당 선박의 풍하중

계수로 본 연구에서는 풍동시험을 통해 얻어진 값을 이용하였으며, 풍하중 계수에는 불확도 성분이 없는 것으로 간주하였다. 또한 투영면적( $A_{XV}$ )과 대지속도( $V_G$ )의 불확도는 풍속 및 풍향에 비해 작을 것으로 간주하여 무시하고, 상대풍속과 풍향에 대해서 각각 정규분포와 균일분포로 가정하였다.

파도에 의한 부가저항 보정은 식(2)을 통해 이뤄지며, 불확도 요소로는 파고, 파향, 파주기, 너울의 파고, 파향, 파주기 등이 있을 수 있다. 본 시운전 시험은 상당히 온화한 해역에서 수행되었으며, 파도는 목측을 통해 계측되었으나 목측의 표준 불확도를 가정하는 것은 쉽지 않다. 다행히 해역이 상당히 온화한 해역이어서, 파고에 대한 불확도는 일반적인 파고 측정 장비의 스펙을 고려하여  $\pm 10\%$ , 주기 및 파향에 대해서는 각각  $\pm 0.5$ 초,  $\pm 10^\circ$ 로 가정하였다.

$$R_{AW} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega, \alpha, V_s)}{\zeta_A^2} E(\omega, \alpha) d\omega d\alpha$$

$$R_{wave} = R_{AWML} + R_{AWRL}$$

$$R_{AWML} = 4\rho s g \zeta_A^2 \frac{B^2}{L_{pp}} r_{aw}(w)$$

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} \rho s g \zeta_A^2 B \alpha_1(w) \quad (2)$$

여기서,  $R_{AW}$ 는 파도에 의한 부가저항의 총합을 의미하고, 이는 선박의 운동에 기인하는 저항증가량( $R_{AWML}$ )과 반사파에 의한 저항증가량( $R_{AWRL}$ )의 합을 통해 구해질 수 있고,  $E(\omega, \alpha)$ 는 단위면적당 방향 스펙트럼을 의미한다.

속도 시운전이 수행된 해역은 상당히 따듯하였다. 속도 시운전의 경우 비교적 짧은 시간에 수행됨에 따라 공기유향 시스템의 가동/비가동 조건에서 수온차이는 크지 않을 것으로 예상이 가능하다. 그러나 이상적인 조건에서의 전달동력으로 환산할 때에는 15°C 수온을 기준으로 삼기 때문에 적절한 보정이 필요하다. 이러한 관점에서 수온에 대한 부가 저항량 보정은 식(3)을 통해 고려하였다. 불확도 요소로는 수온이며, 수온 계측시스템의 표준 불확도를  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 가정하였다.

$$R_{AS} = R_{T0} \left( \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1 \right) - R_F \left( \frac{C_{F0}}{C_F} - 1 \right) \quad (3)$$

여기서,  $R_{AS}$ 는 수온 및 밀도 변화로 인한 부가저항을 의미하고,  $R_F$ ,  $C_F$ 는 시운전이 수행된 해역의 수온조건에 따른 저항과 마찰계수이며,  $R_{T0}$ ,  $C_{F0}$ 는 기준이 되는 수온(15°C 조건)에서의 전 저항과 마찰계수를 의미한다.

#### 4. 불확실성 해석 결과

본 연구에서는 마찰저항 저감을 위해 설치한 선저부 공기 유탈시스템의 가동/비가동 조건에서 동력이 얼마만큼 절감되었는지 그리고 절감된 동력의 크기가 얼마만큼 신뢰할 만한 값인지, 어떠한 불확도 요인이 절감된 동력의 크기에 영향을 미치는지에 대해서 상세히 다루고자 한다.

##### 4.1 축 동력 계측 시스템의 불확실성 해석

선저부 공기유탈 시스템의 가동/비가동 조건에 따라 축 동력 계측 시스템은 바뀌지 않는다. 따라서 동일한 시스템을 이용하였기 때문에 축 동력 계측 시스템의 합성 표준 불확도는 기존의 연구결과를 참고하여,  $\pm 1.385\%$ 로 동일하게 사용하였다(Seo et al., 2019). 공기 유탈 시스템 가동을 위해 추가적으로 사용되는 압축기의 소요 동력의 표준 불확도는 제작사의 자료를 바탕으로  $\pm 5\%$ 의 균일분포로 가정하였다.

##### 4.2 외란 보정량에 대한 불확실성 해석

시운전 해역에서 계측된 풍속 및 풍향을 통해 바람에 의한 부가저항을 추정하고, 부가저항 추정량에 대한 불확실성 해석을 수행하였다. Table 1은 공기유탈시스템을 가동하지 않은 조건에서 바람에 의한 부가저항 추정값 및 불확실성 해석결과를 나타내고 있다. 또한 Table 2는 공기유탈시스템을 가동한 조건에서 바람에 의한 부가저항 추정값 및 불확실성 해석결과이다.

Table 1에서  $R_{AA}$ 는 바람에 의한 부가저항 추정량이며, + 부호의 의미는 맞바람으로 인해 추가적인 저항 증가량을 의미하고, -부호는 뒷바람의 영향으로 발생한 저항 감소량을 의미한다. MCR의 50%-1<sup>st</sup>, 50%-2<sup>nd</sup> 조건에서 바람에 의한 부가저항의 확장 불확도(U)는 95% 신뢰구간에서 각각  $\pm 6.1\%$ ,  $\pm 14.4\%$ 인 것으로 나타났으며, 최대 11.8%, 38.3%로 나타났다. 이중 90% MCR조건에서 38.3%으로 큰 이유는 평균값 자체가 32kN으로 작기 때문이다.

Table 1 Uncertainty of resistance increase due to wind (Air\_OFF)

	$R_{AA}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	- 66.5	$\pm 4.0$	$\pm 6.1$
50% 2 <sup>nd</sup>	110.1	$\pm 15.9$	$\pm 14.4$
75% 1 <sup>st</sup>	- 89.8	$\pm 1.1$	$\pm 1.2$
75% 2 <sup>nd</sup>	152.6	$\pm 18$	$\pm 11.8$
90% 1 <sup>st</sup>	- 48.2	$\pm 6.5$	$\pm 11.8$
90% 2 <sup>nd</sup>	32.1	$\pm 12.3$	$\pm 38.3$

Table 2에서 MCR의 50%-1<sup>st</sup>, 50%-2<sup>nd</sup> 경우 바람의 의한 부가저항은 확장 불확도(U)는 95%신뢰구간에서 각각  $\pm 5.2\%$ ,  $\pm 17.8\%$ 인 것으로 나타났으며, MCR의 75%, 90% 조건에서는 최대 13.6%, 16.5%로 나타나 공기유탈시스템을 가동하지 않은 조건에서 해석결과와 유사하였다. 즉 시운전 수행동안 급격한 변화 등은 발생되지 않은 것을 알 수 있다.

Table 2 Uncertainty of resistance increase due to wind (Air\_ON)

	$R_{AA}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	-58.5	$\pm 3.0$	$\pm 5.2$
50% 2 <sup>nd</sup>	67.4	$\pm 12.0$	$\pm 17.8$
75% 1 <sup>st</sup>	-93.5	$\pm 2.1$	$\pm 2.3$
75% 2 <sup>nd</sup>	146.4	$\pm 19.9$	$\pm 13.6$
90% 1 <sup>st</sup>	-80.8	$\pm 4.6$	$\pm 5.7$
90% 2 <sup>nd</sup>	139.9	$\pm 23.0$	$\pm 16.5$

Table 3, 4는 공기유탈시스템의 가동/비가동 조건에서 수행된 파도에 의한 부가저항 추정값과 추정값에 대한 불확실성 해석결과를 각각 나타내고 있다. 시운전 결과에서 파도에 의한 부가저항( $R_{AW}$ )이 없는 경우는 파도 입사각이 선수부를 기준으로  $\pm 45^\circ$ 를 벗어나는 경우이며, 이때는 파도에 의해 발생되는 추가적인 부가저항은 없는 것으로 간주한다(ISO, 2015).

두 조건 모두 모든 MCR 조건에서 파도에 의한 부가저항의 확장 불확도는 95% 신뢰구간(k=2)에서 약  $\pm 16\%$  이하로 나타났다. 즉, 공기유탈 시스템 가동/비가동 조건 모두 파도에 의한 불확도 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

Table 3 Uncertainty of resistance increase due to wave (Air\_OFF)

	$R_{AW}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
50% 2 <sup>nd</sup>	56.9	$\pm 8.8$	$\pm 15.5$
75% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
75% 2 <sup>nd</sup>	81.3	$\pm 12.8$	$\pm 15.7$
90% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
90% 2 <sup>nd</sup>	83.3	$\pm 13.0$	$\pm 15.6$

Table 4 Uncertainty of resistance increase due to wave (Air\_ON)

	$R_{AW}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
50% 2 <sup>nd</sup>	57.4	$\pm 8.9$	$\pm 15.4$
75% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
75% 2 <sup>nd</sup>	81.7	$\pm 12.6$	$\pm 15.5$
90% 1 <sup>st</sup>	-	-	-
90% 2 <sup>nd</sup>	83.3	$\pm 12.9$	$\pm 15.5$

Table 5, 6은 수온 및 밀도에 의한 부가저항 값 및 부가저항 추정값의 불확실성 해석결과를 보여주고 있다. 모든 MCR 조건에서 95% 신뢰구간(k=2)에서 약 3.3%의 확장 불확도를 갖는 것으로 나타났으며, 수온 및 밀도변화로 발생하는 저항 보정량은 최종 속도성능에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 예상되었다.

Table 5 Uncertainty for the effects of water temperature and density (Air\_OFF )

	$R_{AS}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	-36.4	±1.2	±3.3
50% 2 <sup>nd</sup>	-36.1	±1.2	±3.3
75% 1 <sup>st</sup>	-47.5	±1.5	±3.2
75% 2 <sup>nd</sup>	-46.7	±1.5	±3.2
90% 1 <sup>st</sup>	-51.1	±1.6	±3.2
90% 2 <sup>nd</sup>	-51.1	±1.7	±3.2

Table 6 Uncertainty for the effects of water temperature and density (Air\_ON )

	$R_{AS}$ (kN)	U (95%, k=2) (kN)	U (95%, k=2) (%)
50% 1 <sup>st</sup>	-37.6	±1.2	±3.3
50% 2 <sup>nd</sup>	-36.1	±1.2	±3.3
75% 1 <sup>st</sup>	-47.6	±1.5	±3.2
75% 2 <sup>nd</sup>	-48.4	±1.6	±3.3
90% 1 <sup>st</sup>	-51.3	±1.7	±3.2
90% 2 <sup>nd</sup>	-51.3	±1.7	±3.2

4.3 전달동력에 대한 불확실성 해석

공기유탄시스템을 가동한 경우, 이상적인 조건으로 환산된 전달동력( $P_{Did}$ )은 식(4)를 통해 추정하게 된다. 본 식은 ISO 15016에서 제시한 방법에 추가적으로 공기공급을 위해 소모되는 동력( $P_{ms-ALS}$ )을 고려하였다.

$$P_{Did} = P_{Dms} + P_{ms-ALS} - \Delta P \tag{4}$$

여기서,  $P_{Dms}$ 는 프로펠러 축에서 계측된 동력이며,  $P_{ms-ALS}$ 는 공기공급을 위해 사용되는 압축기의 동력,  $\Delta P$ 는 시운전 해역의 환경적 외란의 영향을 보정하기 위한 부가저항의 합이다.

공기유탄시스템 가동여부에 따라 계산된 축 동력 계측시스템의 불확도와 외란의 영향을 반영한 불확도를 모두 고려하여 정수 중 전달동력에 대한 불확실성 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 7에 보인다.

불확실성 해석 결과 각각의 MCR조건에서 추정된 전달동

력은 95% 신뢰구간(k=2)에서 약 ±1.2%의 확장 불확도인 것으로 나타났다. 이는 공기유탄시스템을 가동하지 않은 경우의 전달동력 불확실성 결과와 동일한 것을 알 수 있다. 즉 공기유탄시스템 가동/비가동 시운전 시 외란의 변화가 크지 않았음을 짐작할 수 있다. 또한 공기공급시스템의 표준 불확도 역시 크게 기여하지 않은 것으로 판단 할 수 있다.

MCR 75%에서 추정된 전달 동력( $P_{Did}$ )은 95%신뢰구간(k=2)에서 ±225kW(약 ±1.2%)의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

Table 7 Uncertainty for corrected ideal power

	MCR	U (95%, k=2) (kW)	U (95%, k=2) (%)
Air OFF	50%	± 164.2	±1.2
	75%	± 227.3	±1.2
	90%	± 265.1	±1.2
Air ON	50%	±149.6	±1.2
	75%	±224.8	±1.2
	90%	±263.9	±1.2

4.4 동력 절감 효과에 대한 불확실성 해석

Fig. 2는 본 연구를 통해 추정된 전달 동력에 대한 불확실성 해석결과이다. 공기유탄시스템을 가동시킨 경우 전달동력( $P_{Did}$ )은 공기공급을 위해 소모되는 동력까지 이미 고려한 것이므로, 공기유탄시스템 가동여부에 따른 전달동력의 차이가 순 동력 절감율 이라 할 수 있다.

Kim et al.(2017)이 언급한 바 와 같이 선저 공기공급을 통한 순 동력 절감율은 17.5노트에서 약 3.2%인 것이 확인된 바 있다. 여기에 본 연구를 통해 도출한 동력 절감량의 확장 불확도인 2.7%(95%신뢰구간, k=2)를 고려할 경우, 공기유탄시스템의 동력 절감량은 최소 +0.5%에서 최대 +5.9%의 범위를 갖는다고 할 수 있다.

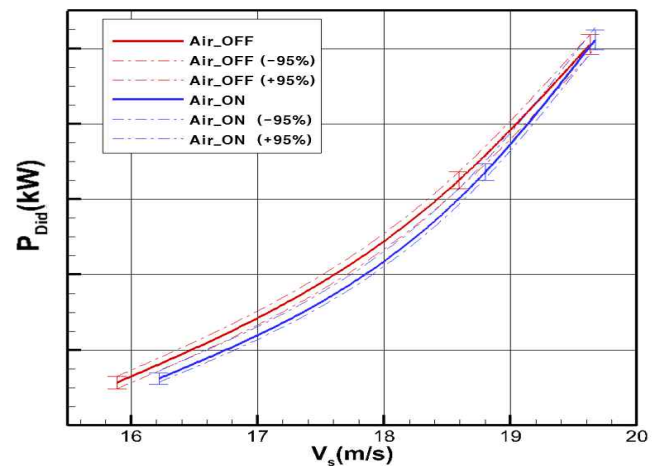


Fig. 2 Results of the uncertainty analysis on power saving between Air-OFF and Air-ON condition

Fig. 3은 공기유탄시스템을 가동한 경우, MCR 75%에서 왕복 시운전 결과를 바탕으로 추정된 동력( $P_{Did}$ )의 분산기여도를 나타낸 것이다.

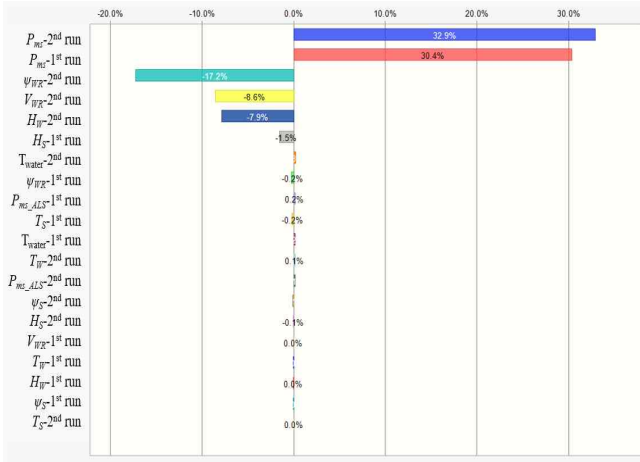


Fig. 3 Sensitivity of corrected shaft power on basic input parameters (MCR 75%, Air-ON)

MCR 75%조건에서 추정된 전달동력의 불확실성 해석결과 가장 큰 영향을 주는 인자는 왕복 시운전시 축 동력계측시스템( $P_{ms-1^{st}}$  run,  $P_{ms-2^{nd}}$  run)로 나타났으며, 각각 33%, 31%의 기여도를 갖는 것으로 추정되었다. 이는 기존연구결과(Seo et al., 2019)와 유사한 수준임을 알 수 있다. 두 번째로는 풍향( $\psi_{WR-2^{nd}}$  run)과 풍속( $V_{WR-2^{nd}}$  run)이 각각 18%, 9%정도를 차지하는 것으로 나타났으며, 세 번째로는 파고( $H_{W-2^{nd}}$  run)가 8%인 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공기유탄시스템이 실제 얼마만큼의 동력을 절감할 수 있는지를 추정하고, 동력 절감량에 대한 신뢰구간이 얼마나 되는지를 파악하기 위해 불확실성 해석을 수행하였다. 또한 동력 절감량에 미치는 주요 인자 및 절감량에 대한 민감도 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) MCR 75%조건(Air\_ON)에서 수행한 왕복시운전에 대해 선속-동력 불확실성 해석결과 95%신뢰구간 (k=2)에서 바람에 의한 부가저항 확장 불확도는 각 2.3%, 13.6%이며, 파도에 의한 부가저항 확장 불확도는 15.5%, 수온 및 밀도에 의한 부가저항 확장 불확도는 3.3%로 추정되었다.

2) 이상적인 조건으로 환산한 전달동력( $P_{Did}$ )의 확장 불확도는 약  $\pm 1.2\%$ 이며, 이를 선속으로 환산하면 약  $\pm 0.1$ knot 이내로 계측 불확실성은 크지 않은 것으로 나타났다.

3) 17.5knot에서 공기공급을 위해 소요되는 동력을 고려한

순 동력 절감량의 평균값은 3.2%이며, 95% 신뢰구간(k=2)에서 동력 절감량은  $\pm 2.7\%$ 로, 불확도를 고려한 공기유탄시스템의 동력 절감량은 +0.5%에서 +5.9%의 범위로 나타났다.

#### 후 기

본 논문은 2020학년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원 및 교육부와 한국연구재단의 재원으로 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 지원으로 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Aldous, L., Smith, T., Bucknall, R. and Thompson, P.(2015), Uncertainty analysis on ship performance monitoring. Ocean Engineering, 110, pp. 29-38.
- [2] Brown, A. and Chen,(2002), Probabilistic Method for Predicting Ship Collision Damage. Ocean Engineering International Journal, 6(1), pp. 55-65.
- [3] Coraddu, A., Figari, M. and Savio, S.(2014), Numerical investigation on ship energy efficiency by Monte Carlo simulation. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 228(3), pp. 220-234.
- [4] Han, B. W., Seo, J. H., Lee, S., J., Seol, D. M. and Rhee, S. H.(2017), Uncertainty assessment for a towed underwater stereo PIV system by uniform flow measurement. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 10(5), pp. 596-608.
- [5] ISO JCGM 100(2008a), Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [6] ISO JCGM 101(2008b), Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement- Propagation of distributions using Monte Carlo method.
- [7] ISO 15016(2015), Ships and marine technology- Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data.
- [8] ISO 19030(2016), Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance.
- [9] Insel, M.(2008), Uncertainty in the analysis of speed and powering trials, Ocean Engineering, 35, pp. 1183-1193.
- [10] International Towing Tank Conference (ITTC),(2002), Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC - The Specialist Committee on Speed and Powering Trials.
- [11] International Towing Tank Conference (ITTC),(2005), Recommended Procedures and Guidelines - Testing and Extrapolation Methods Loads and responses, Seakeeping Experiments (7.5-02-07-02.1).

- [12] Kamal, I. M., Binns, J., Bose, N. and Thomas, G.(2013), Reliability assessment of ship powering performance extrapolations using Monte Carlo methods. Third International Symposium on Marine Propulsor, Tasmania, Australia, May, 2013.
- [13] Kim, J. H., Kim, J. J., Kim, S. M., Kim, J. K., Choi. S. H., Lee, D. H. and Kim, B. K.(2017), A study on full scale application of Samsungs air lubrication system(SAVER Air) for an LNG carrier. The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Busan, Republic of Korea, 19-20 April 2017.
- [14] Park, D. W., Kim, M. G. and Kang, S. H.(2003), Uncertainty Analysis for the Resistance and Self-Propulsion Test of Ship Model. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 40(5), pp. 1-9.
- [15] Park, D. M., Kim, T. Y. and Kim, Y.(2012), Study on Numerical Sensitivity and Uncertainty in the Analysis of Parametric Roll. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 49(1), pp. 60-67.
- [16] Seo, D. W., Kim, M. S. and Kim, S. Y.(2019), Uncertainty Analysis for Speed and Power Performance in Sea Trial using Monte Carlo Simulation. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 56(3), pp. 242-250.

---

Received 20 October 2020  
Revised 10 November 2020  
Accepted 19 November 2020