

# 이중 모형 해석을 통한 선박의 최적 운항 자세 도출

이 증 현<sup>1</sup>, 하 성 용<sup>1</sup>, 이 동 민<sup>2</sup>, 최 상 규<sup>2</sup>, 신 재 구<sup>2</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 조선·해양플랜트공학과

<sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

선박의 최적 운항 자세를 찾기 위해 자유 수면을 포함한 저항 해석을 수행할 경우 많은 격자를 이용한 비정상 해석으로 인해 계산 시간이 오래 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 개선하여 이중 모형을 이용한 정상 해석을 통해 보다 효율적으로 선박의 최적 운항 자세를 도출하는 방법을 연구하였다. KCS를 대상으로 선정하여 설계속도(24knots)와 저속(15knots)인 경우에 대하여 평형 상태 및 선수선미 트림 상태에서 이중 모형 수치해석을 수행하고 기존의 연구결과와 비교하였다. 그 결과 자유수면 유무와 속도에 상관없이 선체 자세에 따른 저항 값은 동일한 경향을 갖는 것을 확인하였다. 하지만 저속일 경우 트림조건에 따른 저항의 변화의 폭에서 차이를 보였으며, 이는 압력저항에 기인한 것이다. 따라서 이중 모형을 이용한 저항 해석은 압력저항의 변동이 큰 경우에는 적용되기 어렵다는 한계점이 있다. 하지만 마찰 저항이 주요한 경우에 적용되어 계산 효율을 획기적으로 높일 수 있으며, 정성적인 경향을 제시할 수 있는 타당한 방법이라 사료된다.

**Key Words** : 전산유체역학(CFD), 이중 모형 해석(Double body analysis), 최적 운항 자세(Optimum trim condition), 저항(Resistance), 자유수면(Free surface)

## 1. 서 론

온실 가스 및 대기 오염 물질 배출을 저감하고자 하는 국제적 규제가 강화됨에 따라 선박의 운항 성능을 향상시키기 위해 다양한 연구가 수행되고 있다. 최적 선형을 개발하기 위한 연구[1], 최적 프로펠러를 설계하여 추진 효율을 향상시키기 위한 연구[2], 경사 용골을 이용해 조파 저항을 감소시키는 연구[3], 선체 저항을 최소화할 수 있는 최적 운항 자세를 찾기 위한 연구[4] 등이 대표적 사례이다. 이러한 연구 중 구상 선수를 개조하거나 최적 프로펠러를 이용한 선박의 운항 성능 개선은 별도의 제조 공정이나 부품 교체가 필요한 반면, 최적 운항 자세를 이용한 운항 성능 개선은 평형수나 컨테이너와 같은 화물 배치만으로 가능하므로 위험 부담이 적은 것이다.

최적 운항 자세는 주로 트림 각도로 평가되는데, 이에 대한 연구는 모형 시험이나 전산 유체 해석(computational fluid dynamics, CFD)을 통해 수행할 수 있다. 모형 시험의 경우 예인 수조에서 모형선을 일정 속도로 이동시키면서 진행 방향의 선체 저항을 측정하는 방식으로 이루어진다. 선체 트림 각도에 따른 저항 변화의 신뢰도가 높은 반면, 모형선 제작을 포함한 시험 수행비용이 비싸기 때문에 시험 횟수가 많이 필요한 최적 트림에는 모형 시험이 비효율적이다. 수치 해석을 이용한 방법은 수행비용이 저렴한 장점이 있으나 수치 해석의 신뢰성을 확보하는 것이 쉽지 않은 일이다. 최근 발표된

연구 결과[5]를 통해 수치 해석을 이용한 저항 해석 결과가 높은 통계적 신뢰도를 갖고 있다는 사실을 확인함에 따라 CFD를 이용한 최적 트림 자세에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[6]. 이러한 기존의 CFD 연구들은 예인 수조의 모형 시험을 모사하기 위해 자유 수면과 선체의 동적 운항 자세를 모두 고려하여 120만개 이상의 격자를 사용한 비정상 유동 해석에 해당한다.

만일 선박의 트림 각도에 따른 저항의 차이가 조파 저항에 의한 것이라면 자유 수면을 고려한 비정상 해석이 필수적이거나, 만일 저항 차이가 트림 각도에 따른 형상 변화에 의한 것이라면 이중 모형을 통한 정상 해석만으로 우열 비교가 가능할 것이다. 자유 수면을 고려한 기존의 비정상 유동 해석은 120만개 이상의 격자를 사용하여 약 15,000회의 반복 계산이 필요한 반면, 이중 모형을 활용할 경우 40만개 정도의 격자를 이용하여 500회의 반복 계산만으로 저항 추정이 가능하므로 매우 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 EDISON에서 제공하는 선박 저항 성능 추정 해석자(SNUFOAM\_Ship\_Resistance)를 활용하여 이중 모형을 통한 정상 유동 해석을 수행함으로써 트림 각도에 따른 저항의 차이를 살펴보고자 한다. 또한 자유 수면을 고려한 저항 결과와 비교함으로써 선박의 최적 운항 자세를 도출하기 위해 이중 모형의 정상 유동 해석이 활용 가능한지 검토해 보았다.

## 2. 수치기법

### 2.1 대상선 및 해석 케이스 선정

대상선은 선형이 공개된 KCS(Kriso container ship)이며, 제원은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 KCS data

	Full scale	Model scale
$L_{pp}$	230m	7.2786m
Design draught	10.8m	0.3418m
Displacement	52,030m <sup>3</sup>	0.8244m <sup>3</sup>
Design speed	24knots	2.1962m/s
Scale ratio	31.6	31.6

KCS의 트림 자세는 평형(even, EV), 실선 평형 상태를 기준으로 1.2m 선수 트림(trim by head, TH), 실선 평형 상태를 기준으로 1.2m 선미 트림(trim by stern, TS)으로 구분하였다. 선수미 트림 높이를 1.2m로 선정한 이유는 이보다 커질 경우 선미 트림에서 구상 선수가 수면에 매우 가까이 근접하거나 수면 위로 돌출되어 이중 모형의 정렬 격자 구성이 매우 어렵기 때문이다. 속도는 설계 속도(24 knots)와 저속(15knots)으로 설정하였다. 따라서 본 연구에서 수행한 경우는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Analysis condition and case

	Trim by head	Even	Trim by Stern
24knots	TH_24	EV_24	TS_24
15knots	TH_15	EV_15	TS_15

### 2.2 계산 영역 및 격자 구성

EDISON의 선박 저항 성능 추정 해석자(SNUFOAM\_Ship\_Resistance)서는 아래 Fig. 1과 같은 계산 영역을 추천하고 있으나, 본 연구에서는 보다 효율적인 계산을 위해 Fig. 2와 같이 계산 영역을 감소시켰으며 계산 영역의 형상도 직육면체로 설정하였다. 다만 EDISON의 해석자 활용을 위해 경계 조건의 위치와 이름은 동일하게 설정하였다.

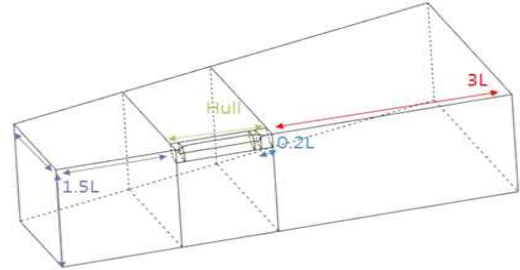


Fig. 1 Recommended calculation area for SNUFOAM Ship Resistance

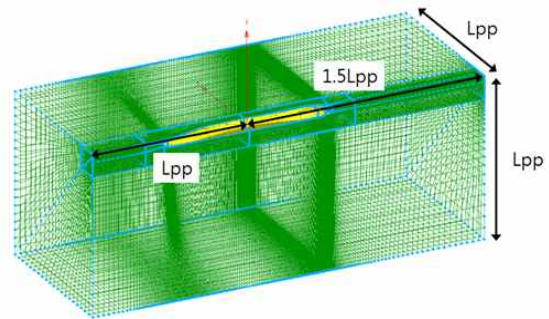


Fig. 2 Calculation area applied this study

KCS의 이중 모형 해석을 위해 정렬 격자를 생성하였다. 선체의 트림 자세에 따라 기하학적 형상이 모두 변하므로 선수 트림, 평형, 선미 트림에 대해 각각 격자를 생성하였으며 생성된 총 격자 수는 Table 3과 같다. 선수 트림일 경우 평형인 경우에 비해 선미의 침수 면적이 감소하므로 선체 표면 격자가 감소하면서 공간 격자도 감소하였으며, 선미 트림일 경우 반대로 선체 표면 격자가 증가하면서 공간 격자도 증가하였다. 선체 중앙부 및 선수 격자는 모두 동일한 형태로 유지하였다. 선체 마찰 저항을 정도 높게 추정하기 위해 선체 표면의 첫 번째 격자 간격은 0.005m를 유지하도록 하였다. 또한 압력 저항을 정확하게 추정하기 위해 구상 선수와 선미 쪽에서 격자 간격을 조밀하게 구성하였다. 본 연구에서 격자는 Pointwise를 사용하여 생성하였으며, FLUENT 형식인 cas 확장자로 출력하여 EDISON의 입력 조건으로 사용하였다.

Table 3 Analysis condition and number of mesh

	Trim by head	Even	Trim by Stern
Spatial Grid	392,000	412,800	422,400
Hull Surface Grid	3,840	4,240	4,360

각 경우에 대해 선체 표면 격자를 Fig. 3에 나타내었다. 각 그림에서 격자의 자세한 관찰을 위해 1:20의 중횡비를 사용하였다.

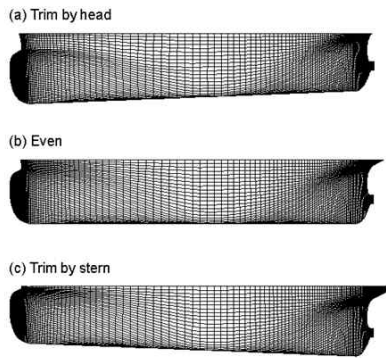


Fig. 3 Composition of surface grid by trim condition

### 3. 결과 및 토의

EDISON의 해석자를 이용하여 각 트림 자세 별, 속도 별로 얻은 저항 값을 Table 4에 나타내었다. 기존의 연구 결과를 활용하여 동일한 트림 자세에서 자유 수면이 있는 경우의 저항 값과 FLUENT를 이용하여 이중 선체 모형을 해석한 결과도 같이 나타내었다. 표에서 DB는 이중 모형을 나타내며, FS는 자유 수면이 있는 경우의 수치 해석을 뜻한다. 각 속도 별 그리고 트림 자세 별 저항 값을 나타내었으며, 평형 상태에서의 저항 값을 100%기준으로 자세 별 저항 값의 크기를 비교하였다.

Table 4 (a) Comparison of resistance according to analysis condition @ 24knots

Speed	Solver	Trim by head	Even	Trim by Stern
24 knots	EDISON (DB)	33.12N	33.39N	34.29N
		99.2%	100.0%	102.7%
	FLUENT (DB)	35.60N	36.28N	36.67N
		98.1%	100.0%	101.1%
	STAR-CCM+ (FS)	40.03N	40.90N	42.07N
		97.9%	100.0%	102.9%

Table 4 (b) Comparison of resistance according to analysis condition @ 15knots

Speed	Solver	Trim by head	Even	Trim by Stern
15 knots	EDISON (DB)	13.92N	14.04N	14.40N
		99.1%	100.0%	102.6%
	FLUENT (DB)	14.93N	15.22N	15.38N
		98.1%	100.0%	102.6%
	STAR-CCM+ (FS)	14.53N	15.42N	16.99N
		94.2%	100.0%	110.1%

자유 수면의 고려 유무나 속도와 상관없이 선수 트림인 경우 저항이 가장 작게 예측되었으며, 선미 트림인 경우 선수 트림이나 평형 상태에 비해 저항이 크게 예측되었다. 자세히 살펴보면 설계 속도인 24 knots에서는 평형 상태에 비해 선수 트림 상태에서 저항이 1% 정도 감소하였으며, 선미 트림에서는 평형 상태에 비해 3% 정도 저항이 증가하였다. 자유 수면이 고려된 경우 선수 트림에서 저항이 2% 정도 감소하였고 선미 트림인 경우 저항이 3% 정도 증가하였다. 설계 속도에서는 이중 모형을 사용하더라도 자유 수면을 고려한 경우와 매우 유사한 경향이 나타나며 저항의 변동 폭도 유사하였다. 한편 속도가 낮은 저속 영역에서는 이중 모형의 경우 선체 자세에 따른 저항 변화 폭이 설계 속도와 거의 동일한 반면, 자유 수면이 고려된 경우에는 선수 트림인 경우 평형 상태에 비해 6% 정도 감소하였으며 선미 트림인 경우 10% 정도 저항이 증가하였다. 즉 저속 영역에서는 이중 모형을 사용할 경우 자유 수면이 있는 경우와 비교하여 선수 선미 트림에 따른 저항의 증감 유무는 동일한 경향을 보이거나 저항의 변화 폭에서는 큰 차이를 보여주었다.

속도에 따라 이중 모형과 자유 수면이 서로 다른 경향을 보이는 원인을 밝히기 위해 저항 성분을 압력 저항과 마찰 저항으로 구분하여 비교하였다. EDISON 해석자에서는 총 저항 성분만 주어지므로 계산 완료된 vtk 데이터 중에서 압력 면 적분하여 압력 저항 성분을 구하고 총 저항에서 압력 저항을 뺀 값을 마찰 저항으로 계산하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 설계 속도에서 선수 트림일 경우 자유 수면의 고려와 상관없이 평형 상태에 비해 압력 저항은 증가하였음에도 불구하고 마찰 저항이 더 많이 감소하면서 전체 저항이 감소하였다. 반면 선미 트림에서는 자유 수면이 있는 경우에는 마찰 저항이 감소하였으나 압력 저항이 크게 증가하면서 전체 저항이 증가하였고, 이중 모형에서는 마찰 저항과 압력 저항이 같이 증가하였다. 저속에서 선수 트림을 살펴보면 이

중 모형인 경우에는 압력 저항은 증가하였으나 마찰 저항이 더 크게 감소하였고, 자유 수면이 있는 경우에는 압력 저항과 마찰 저항이 모두 감소하였다. 선미 트림을 살펴보면 이중 모형과 자유 수면인 경우 모두 압력 저항과 마찰 저항이 모두 증가하였으나, 자유 수면인 경우 압력 저항이 매우 크게 증가하였다.

Table 5 Analysis of Resistance component according to analysis condition

Speed 24 knots				
Solver	Resistance	Trim by head	Even	Trim by Stern
EDISON (DB)	Total	33.12N	33.39N	34.29N
	Press.	4.00N	3.85N	3.96N
	Viscous	29.12N	29.54N	30.33N
STAR-CCM+ (FS)	Total	40.03N	40.90N	42.07N
	Press.	8.53N	8.23N	9.70N
	Viscous	31.50N	32.67N	32.37N
Speed 15 knots				
Solver	Resistance	Trim by head	Even	Trim by Stern
EDISON (DB)	Total	13.92N	14.04N	14.40N
	Press.	1.65N	1.59N	1.63N
	Viscous	12.27N	12.45N	12.77N
STAR-CCM+ (FS)	Total	14.53N	15.42N	16.99N
	Press.	1.65N	2.19N	3.54N
	Viscous	12.88N	13.23N	13.44N

이러한 성분 분석에 따른 특성을 정리해 보면 설계 속도의 선수 트림에서는 마찰 저항 감소, 설계 속도의 선미 트림에서는 압력 저항 증가가 중요한 저항 변동 요인이다. 그러나 이중 모형에서는 압력 저항 증가를 제대로 예측하지 못하고 마찰 저항 감소 및 증가를 통해 전체 경향을 맞추었다. 마찬가지로 저속에서의 선수 트림에서는 마찰 및 압력이 모두 감소하면서 큰 폭의 저항 감소가 있었으나 이중 모형에서는 마찰 감소만을 예측하였고, 선미 트림에서는 마찰 및 압력이 모두 증가하였으나 이중모형에서는 마찰 증가만을 예측하였다. 따라서 이중 모형에서는 마찰 변동은 비교적 잘 예측하지만 압력 변동을 잘 예측하지 못하기 때문에 저속에서의 저항 변동 크기를 예측하기 어려웠다. 이상의 운항 자세에 따른 저항

성분의 주요 변동 요인을 Table 6과 같이 요약할 수 있다.

Table 6 Main reason of total resistance fluctuation according to trim condition

Speed	Analysis model	Trim by head	Trim by stern
Design speed	Considering Free surface	decrease of viscous resistance	increase of pressure resistance
	Double body	decrease of viscous resistance	increase of viscous resistance
Lower speed	Considering Free surface	decrease of viscous and pressure resistance	increase of pressure resistance
	Double body	decrease of viscous resistance	increase of viscous resistance

따라서 이중 모형을 이용하여 선수 및 선미 트림에 따른 전체 저항 값의 변동 경향을 잘 예측했다고 하더라도 압력 증가에 따른 저항 변동을 예측하지 못하였다. 선체의 압력 저항이 자유 수면과 밀접한 관련이 있음을 의미하는 것이다. 따라서 이중 모형을 이용한 저항 해석이 마찰 저항이 중요한 경우에는 적용될 수 있으나, 선체 자세에 따라 압력 저항의 변동이 큰 경우에는 적용되기 어렵다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 EDISON에서 제공하는 선박 저항 성능 추정 해석자를 활용하여 KCS의 이중 모형에 대해 정상 유동 해석을 수행함으로써 트림 각도에 따른 저항의 차이를 살펴 보았다. 선체 표면의 격자를 제어하기 위해 정렬 격자를 사용하였으며, 실선 평형 상태 및 1.2m 선수 트림, 1.2m 선미 트림인 경우에 대해 설계 속도 24 knots와 15 knots에 대해 저항 해석을 수행하였다. 선수 및 선미 트림에 따른 전체 저항의 변화를 살펴본 결과 자유 수면이 있는 경우와 비슷한 경향을 보여주었다. 그러나 전체 저항을 마찰 저항과 압력 저항으로 나누어 살펴본 결과 이중 모형에서는 마찰 저항의 변화는 비교적 잘 예측하였으나 자유 수면을 고려하지 않은 관계로 압력 저항의 변화는 제대로 예측하지 못하였다. 따라서 이중 모형을 이용한 저항 해석이 마찰 저항이 중요한 경우에는 적용될 수 있으나, 선체 자세에 따라 압력 저항의 변동이 큰 경우에는 적용되기 어렵다.

## 후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

## References

- [1] 2003, Seo, K.C., Kim, B.E. and Chun, H.H., "Development of an Optimum Hull Form for a Container Ship with Minimum Wave Resistance," *대한조선학회논문집*, Vol.42, No.4, pp.45-48.
- [2] 2015, Park, S.U., Kang, S.M. and Suh, Y.K., "Optimal propeller design and performance evaluation of a propulsion propeller for LNG ships model by using the CFD Analysis," *대한기계학회, 춘계학술대회 논문집*, pp.3-4.
- [3] 2009, Seo, K.C., Mehmet Atlar, Kim, H.J. and Chun, H.H., "Minimization of Wave-making Resistance for "Inclined Keel" Containership," *대한조선학회논문집*, Vol.46, No.2, pp.97-104.
- [4] 2013, Park, D.W., Lee, S.B., Chung, S.S., Seo, H.W. and Kwon, J.W., "Effects of Trim on Resistance Performance of a Ship," *대한조선학회논문집*, Vol. 50, No. 2, pp.88-94.
- [5] 2014, Lee, S.B. and Lee, Y.M., "Statistical Reliability Analysis of Numerical Simulation for Prediction of Model-Ship Resistance," *대한조선학회논문집*, Vol.51, No4, pp.321-327.
- [6] 2014, Park, S.H., Lee, S.B. and Lee, Y.M., "Study on the Estimation of the Optimum Trims in Container Carriers by using CFD Analysis of Ship Resistances," *대한조선학회논문집*, Vol.51, No.5, pp.429-434.