

CFD 저항 해석을 이용한 컨테이너선 최적 트림 추정법에 대한 연구

박상훈·이상봉[†]·이윤모
현대중공업 선박연구소

Study on the Estimation of the Optimum Trims in Container Carriers by using CFD Analysis of Ship Resistances

Sang Hun Park · Sang Bong Lee[†] · Youn Mo Lee
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The main objective of the present study is to elucidate a correlation between ship resistances from computational fluid dynamics (CFD) and brake horse powers (BHP) from towing tank in container carriers. The tests were conducted for a range of combinations of trim conditions and speeds. To achieve this goal, 295 cases of numerical simulation have been performed using Star-CCM+ which had been statistically verified to predict ship resistances (Lee & Lee, 2014). Based on the normal distribution of resistance errors in all cases of the 4 container carriers, the confidence interval of numerical error was estimated as $[-2.33\%, +2.42\%]$ with 95% confidence. The correlation coefficients between the ship resistances of CFD and the brake horse powers of the experiments were higher than 0.93. As a result, the numerical calculation of ship resistances is able to be utilized in order to provide a quick guidance in selection of the optimum loading condition.

Keywords : Optimum trim(최적 트림), CFD(전산유체역학), STAR-CCM+, Resistance(저항), BHP(제동마력)

1. 서론

지구 온난화에 따른 탄소 배출량 규제와 기름값 상승에 따른 비용 증가 등 환경적/경제적 이유로 인해 선박 운항 시 연료를 절감하고자 하는 연구가 최근 들어 많이 수행되고 있다. 선수부 벌브 개조를 통해 실제 운항 조건에서 저항/자항 성능을 개선하고자 하는 연구 (Hochkirch & Bertram, 2009), 운항 자세에 따른 저항/자항 성능 분석을 통해 최적 트림을 찾고자 하는 연구 (Yang & Kim, 2005; Yang, et al., 2006; Choi, et al., 2012; Park, et al., 2013) 그리고 에너지 절감 장치 개발을 통해 선박의 운항 성능을 개선하는 연구 등이 대표적인 사례라고 할 수 있다 (Hollenbach & Reinholz, 2011; Choi, et al., 2013). 이러한 연구 중에서 선수부 벌브 개조나 선미 에너지 절감 장치 개발 등은 선형 수정이나 부가물 장착 등의 별도 건조 공정이 필요한 반면, 최적 트림을 통한 운항 성능 개선은 컨테이너와 같은 화물의 적절한 배치를 통해 연료를 절감할 수 있는 방법이다. 따라서 최적 운항 자세에 대한 연구는 선수부 벌브 개조 및 에너지 절감 장

치 부착보다 운항사나 선주 입장에서 위험 부담이 적은 시도이므로 이에 대한 선주 요구가 증가하고 있다.

다양한 운항 속도 및 흘수에 따른 최적 트림 연구는 모형 시험이나 수치해석(CFD, computational fluid dynamic)을 통해 수행할 수 있다. 모형 시험은 선주 및 운항사의 신뢰도가 높은 반면 수행 비용이 높고 모형 시험 일정을 조율하기 쉽지 않은 단점이 있다. 수치 해석을 이용하는 방법은 수행 비용이 저렴하고 고성능 전산기를 통해 비교적 빠른 시간 내에 결과를 얻을 수 있으나, 수치 해석에 대한 신뢰도를 검증해야 하는 어려움이 있다. 당시의 경우 수치 해석에 대한 신뢰도가 충분히 검증되지 못한 과거에는 트림에 관한 모든 연구를 예인 수조에서의 모형 시험을 통해 수행하였다.

그러나 최근 당사 저항 해석법에 대한 신뢰도 분석이 통계적 관점에서 분석되었고 수치 해석을 통한 저항 해석 결과가 다양한 선종 및 속도에 대해서 높은 정도를 가진다는 것이 검증되었다 (Lee & Lee, 2014). 따라서 본 연구의 목적은 다양한 흘수 및 트림 조건의 CFD 저항 해석 결과로부터 트림에 따른 BHP 경향을 추정할 수 있는지를 밝히고, 이를 통해 최적 트림을 찾기 위한 고

비용의 예인 수조 모형 시험을 최소화 하는데 있다. 상기 목적을 달성하기 위해 본 연구에서는 아래의 프로세스를 수행하였다.

- a. 모형 시험의 저항값(R_m)과 CFD를 이용한 저항값의 비교
- b. 모형 시험의 저항값과 유효마력(effective horse power, EHP), 제동마력(brake horse power, BHP)간 상관 관계
- c. 트림에 따른 CFD의 저항 분포 및 실험으로부터 추정된 BHP 분포의 비교

2. 연구수행 방법

대상선은 6,500 TEU부터 13,100 TEU까지의 다양한 크기의 컨테이너 운반선 4척이다. 대표적으로 CC 2의 경우 LPP = 333.44m, B = 42.8m, D = 11~14.5m의 제원을 가지는 선박이다. 각 선박의 트림 및 속도 조건은 Table 1에 나타내었다. 트림 조건에서 E는 even keel을 의미하고 +는 선수트림(trim by the head) -는 선미트림(trim by the stern)을 의미한다. 예인 수조 실험과 동일한 조건을 만족시키기 위해 CC 1과 CC 2는 선체 중앙(mid-ship)의 평균흘수(mean draft)가 동일한 기준으로 트림이 설정되었고 CC 3와 CC 4는 동일 배수량을 맞추는 기준으로 CFD 계산을 수행하였다. 수치 계산은 상용 점성코드인 Star-CCM+를 사용하였고, 기 검증된 바 있는 당시의 저항 수치 해석 기법을 사용하였다. 모형시험 결과 해석은 형상계수를 이용한 3차원해석법을 사용하였다.

Table 1 Analysis condition of the test ship

Main dimension	CC 1	CC 2	CC 3	CC 4
Fn	0.136-0.214	0.205-0.241	0.087-0.175	0.132-0.221
Trim condition ($T_f - T_a$) + : Trim by the head - : Trim by the stern				-1.5,
	-1.0	-0.5	-1.0	-0.75
	E	E	E	E
	0.5	0.5	1.0	0.75
	1.0	1.0	2.0	1.5
	1.5			

3. 수치해석

3.1 수치 해석 기법

본 연구에서 사용한 좌표계는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 유동 방향이 양(+의) x축이고 선박의 우현이 +y축이며 종력의 반대방향인 -z축으로 하는 직교 좌표계를 사용하였다. 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중앙면(mid-ship) 그리고 자유 수면(free surface)이 만나는 점에 위치한다. 계산영역은 원점에서 선

수부 방향으로 1.5LPP, 선미부 방향으로 2LPP이며 폭 방향으로 1.5LPP 이다. 선체에서 발생한 자유 수면이 계산 영역의 입구, 출구 및 대칭 경계 조건에 의해 왜곡되지 않도록 계산 영역을 설정하였다. 계산 영역의 바닥면은 자유 수면으로부터 1.5LPP에 위치하며, 공기에 해당하는 영역의 높이는 1.0LPP이다. 본 연구에 사용된 모든 물리량은 배 길이(LPP), 선속(V_S 혹은 V_M) 그리고 밀도(ρ)로 무차원화하였다. 유동의 지배방정식인 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_l \frac{\partial U_i}{\partial X_l} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_l} \left(\frac{1}{R_N} \frac{\partial U_i}{\partial X_l} - \overline{u_i u_l} \right) \tag{2}$$

여기서 $U_i = (U, V, W)$ 는 각 좌표축 $x_i = (x, y, z)$ 방향 평균속도 성분이고 ρ , R_N 그리고 $-\overline{u_i u_l}$ 는 정압, 레이놀스 수 그리고 Reynolds stresses를 나타낸다. Reynolds stress 계산을 위한 난류모델로 Reynolds stress model 을 사용하였다.

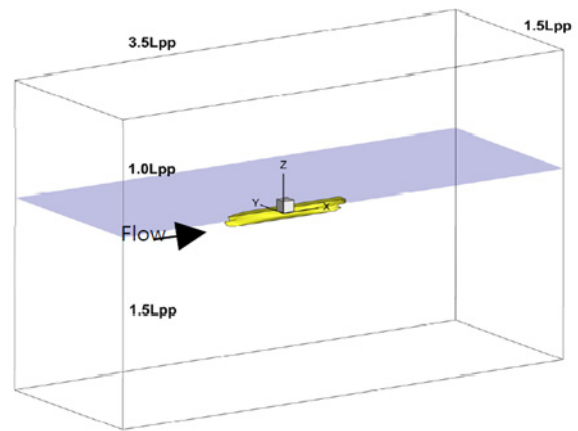


Fig. 1 Computational domain and coordinate system

3.2 수치격자 및 계산조건

선체표면 및 공간격자 생성은 STAR-CCM+에서 제공하는 트리머 격자(trimmed mesh)와 경계층 격자(prism layer)를 사용하였다. 생성된 전체 격자 수는 약 110만개에서 150만개 사이에 분포하고 있으며 격자의 구성은 Fig. 2와 같다. 그림에서 보듯이 트리머는 유동 특성이 복잡한 영역에서 격자를 조밀하게 구성하며, 단순한 영역에서 격자의 크기를 크게 설정하는 방법이다. 이러한 방법으로 전체 격자 수를 효율적으로 감소시킬 수 있으나, 격자가 다면체(polyhedron)인 특성을 지닌다. 따라서 트리머에 의해 만들어진 다면체 격자에서 물리량의 공간 구배(spatial gradient)

를 2차 정확도로 계산하기 위해서는 최소 자승법(least square method)을 사용해야 한다. 그리고 격자 수준이 변하는 영역에서 격자의 면을 통과하는 플럭스(flux)를 내삽할 때 공간 차분 정도가 감소하는 단점이 있다. 따라서 전단력이 중요하게 작용하는 선체 주변에는 경계층 격자를 적용하였다. 총 6개의 경계층 격자를 생성하였으며, 벽함수(wall function)를 적용 하였다. 양질의 경계층 격자를 생성하기 위해 선체 갑판부에는 경계층 격자를 적용하지 않았으나, 갑판에 작용하는 힘은 공기에 의한 전단력으로 전체 저항에서 무시할 수 있는 수준이다.

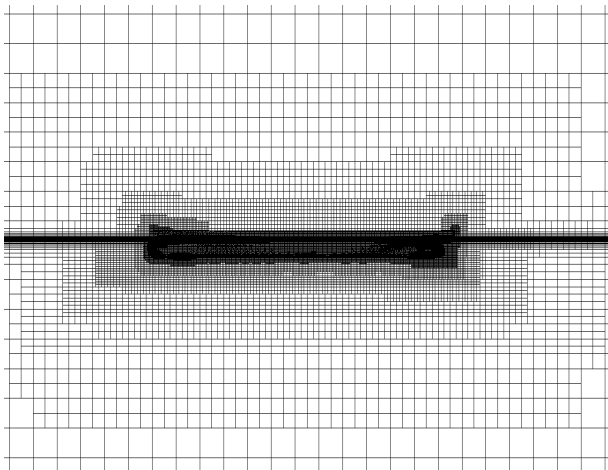


Fig. 2 Numerical grid employed for calculations

자유 수면을 고려하기 위해 VOF(volume of fluid) 방법을 사용하여 다상 유동을 모델링 하였다. 그리고 동적 트림을 고려하기 위해 STAR-CCM+에서 제공하는 DFBI (dynamic fluid body interaction) 기법을 적용하였다. DFBI 기법은 선체의 자세 변화에 따라 계산 영역 전체가 병진/회전하는 방법으로, 선체의 sinkage는 계산 영역 전체의 z 방향 수직 이동으로 나타나며 트림은 계산 영역 전체의 y 방향 회전으로 나타난다. 계산 시간 간격(time interval)은 $\Delta t=0.02$ 를 적용하여 총 90초까지 계산을 수행하였다. 매 시간 간격에서 5회의 내부 계산을 반복하였다. 초기 조건에 따른 자세 오차를 배제하기 위해 계산 1초 후부터 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 통해 선체의 동적 자세 변화를 고려하도록 설정하였다. 선체의 동적 자세를 고려함에 따라 Fig. 3과 같이 결과값이 주기적으로 진동하고 있으므로 결과의 평균값을 구하기 위해 마지막 10초 동안의 결과를 평균하였다. 평균값을 계산하는 시간에 따른 오차는 약 0.3% 미만이다. 입구 경계 조건은 고정 속도 조건 ($V_{in}=V_M$) 및 자유 수면 높이 고정 조건($z=0$)을 사용하였다. 여기서 V_M 과 V_M 은 입구 경계에서의 속도와 모형선의 속도를 의미한다. 동적 자세 변화가 발생할 경우 계산 영역의 위쪽 및 아래쪽 면에서 속도가 유입되도록 입구 경계 조건과 마찬가지로 고정 속도 조건을 적용하였다. 계산 영역의 측면에 대해서는 대칭 (symmetry) 경계 조건을 부과하였다. 출구 경계에는 계산 영역 전체의 질량보존을 만족시키도록 압력 값을 부과하였다.

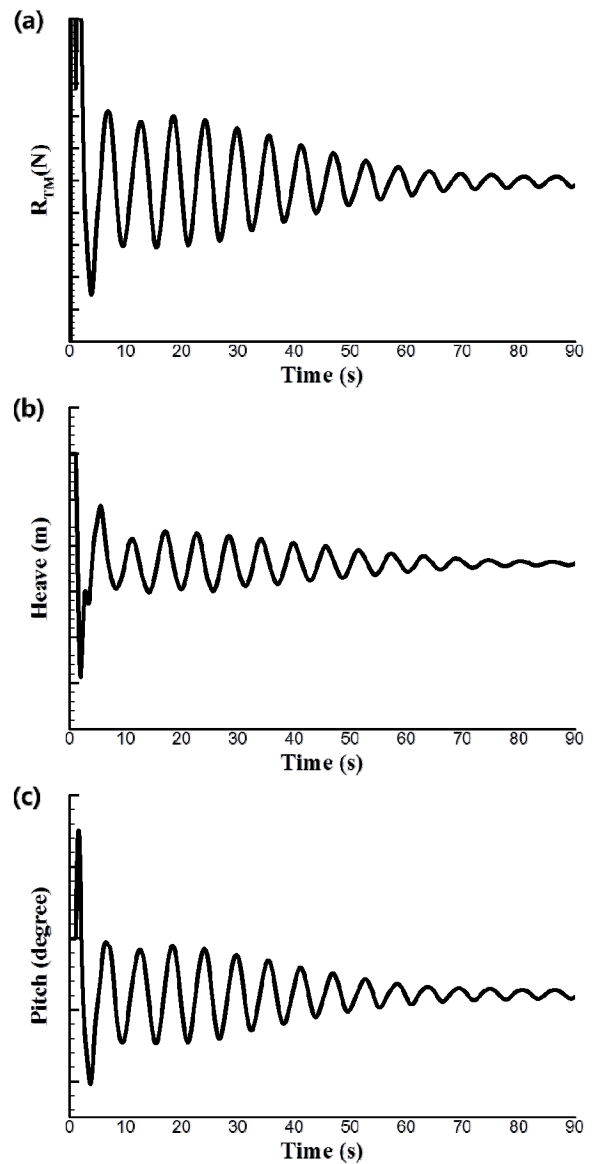


Fig. 3 Time history of (a) R_{TM} , (b) Heave, (c) Pitch

4. 수치계산 및 모형시험 결과

4.1 CFD와 모형 시험의 저항 관계

모형 시험의 저항값과 CFD를 이용한 저항값의 상관 관계를 얻기 위해 대상선 별로 각 흘수, 트림 조건에 대한 CFD 저항 해석 결과를 모형 시험 결과와 비교하였다. 수치 해석과 모형 시험을 통해 얻어지는 모형선의 저항 계수 ($C_{TM} \times 10^{-3}$, 이하 $\times 10^{-3}$ 생략)를 비교하여 오차를 분석하였다. Fig. 4는 CC 2에 대한 모형선의 저항(R_M)과 저항(R_{TM})의 오차를 선속과 트림, 평균 흘수에 따라 나타낸 것으로 모형시험과 본 연구에서 얻은 수치해석 결과가 잘 일치함을 보여주기 위한 그림이다. 보다 정량적인 비교를 위해 각 조건에서 모형 시험 대비 CFD 결과의 오차를 등고선도(contour map)를 통해 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이

모든 영역에서 -1.5%에서 1% 사이의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4에서 흘수 14.5m의 결과만 따로 나타낸 것으로 모형 시험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. CC 1부터 CC 4까지의 모든 CFD 결과와 모형 시험 결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 가로축이 실험 저항 계수이고 세로축이 CFD를 이용하여 얻은 저항 계수이므로 각 저항 계수의 분포가 기울기 1의 1차 방정식에 밀집할수록 정도가 높아짐을 의미한다. 정규성 검정 결과 CFD의 저항값의 오차는 정규성을 만족하였고 통계적 분석을 통해 95%의 신뢰도로 CFD의 저항값을 분석한 결과 모형시험 대비 [-2.33%, +2.42%]의 오차 범위를 가짐을 확인하였다.

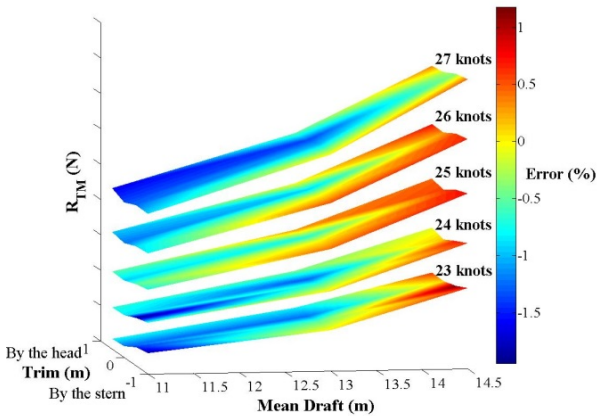


Fig. 4 Distributions of R_{TM} and R_{TM} error in CC 2

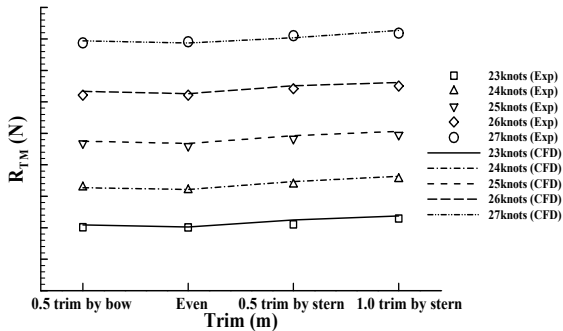


Fig. 5 Comparison of R_{TM} with experimental results in CC 2 at 14.5m draft

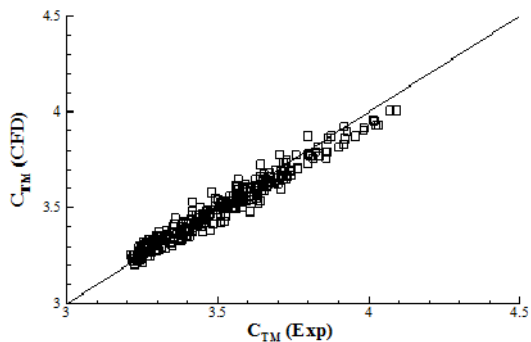


Fig. 6 Comparison of C_{TM} with experimental results

4.2 모형 시험의 저항 및 BHP

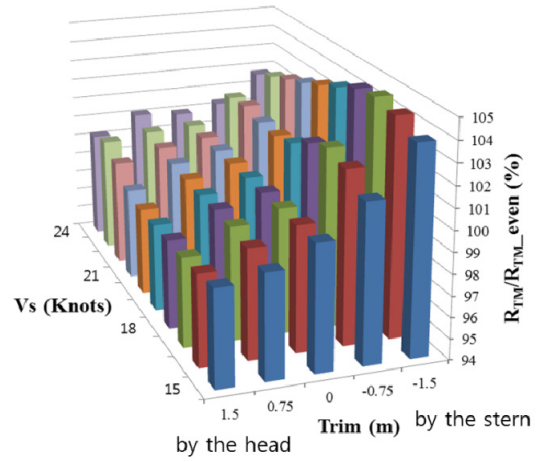


Fig. 7 Influence of trim condition on R_{TM} ratio of CC 4 at 14m draft

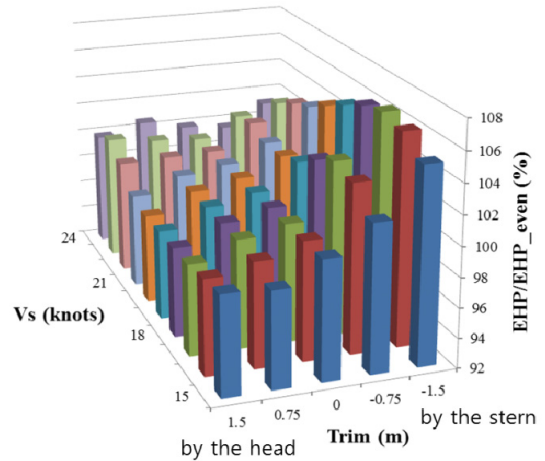


Fig. 8 Influence of trim condition on EHP ratio of CC 4 at 14m draft

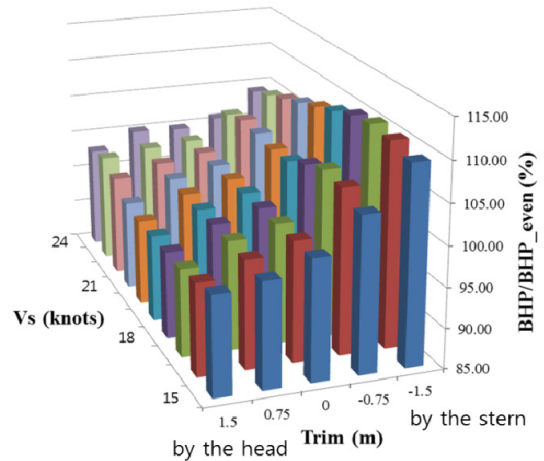


Fig. 9 Influence of trim condition on BHP ratio of CC 4 at 14m draft

선박 별로 모형 시험의 각 흘수 및 트림 조건에서 모형선의 저항값, 유효 마력 그리고 제동 마력의 추세를 분석하였다. Fig. 7부터 Fig. 9까지는 각각 CC 4에 대한 평균 흘수 (14m)에서의 트림과 선속에 따른 저항값, 유효 마력, 제동 마력을 등흘수에서의 값으로 나눈 상대비를 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 저항값은 선수 트림일 경우 등흘수 대비 낮은 값으로, 선미 트림일 경우 높은 값으로 나타난다. 선수 트림에서 저항이나 유효 마력이 감소하는 이유는 Park, et al. (2013)에서 자세히 연구된 바 있다. 유효 마력(Fig. 8)과 제동 마력(Fig. 9)의 경우도 마찬가지로 동일한 추세를 가지는 것을 볼 수 있다. 다른 호선의 경우에도 동일한 결과를 가지는지 알아보기 위해 CC 1부터 CC 4까지의 모든 모형 시험 결과에 대해서 상관 계수를 계산하였다. 저항값과 유효 마력, 저항값과 제동 마력, 유효 마력과 제동 마력 사이의 상관 계수를 계산하여 Table 2에 나타내었다. 상관계수가 1에 가까울수록 완전한 적극적 상관관계(total positive correlation)가 있다는 것이며, -1에 가까울수록 완전한 소극적 상관관계(total negative correlation)가 성립되며, 0에 가까울수록 관계가 없다(no correlation)는 것을 의미한다. 모든 상관 계수가 1에 매우 가까운 값을 나타내는 것을 보아 저항값과 유효 마력, 제동 마력 사이에는 매우 높은 상관 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 저항값의 추세만 알고 있더라도 매우 높은 상관도로 제동 마력의 추세를 예측할 수 있다. 다만 상관 계수에 대한 통계적 신뢰도를 평가하기 위해서는 보다 많은 경우에 대한 데이터 베이스가 확보되어야 하므로 향후 추가적인 연구가 필요하다.

Table 2 Correlation coefficients between R_{TM} , EHP and BHP

	R_{TM}	EHP	BHP
R_{TM}	1	0.944	0.939
EHP	0.944	1	0.955
BHP	0.939	0.955	1

4.3 CFD를 이용한 최적 트림 예측

앞서 분석한 바와 같이 CFD 저항 해석 결과와 모형 시험 결과 값이 잘 일치한다는 것을 확인하였고, 모형 시험의 저항값, 유효 마력 그리고 제동 마력의 상관 관계를 분석하여 저항값의 추세를 통해 제동 마력의 추세를 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 두 결과를 조합하면 CFD 저항 해석 결과로부터 제동 마력의 추세를 예측할 수 있다는 것이다. Fig. 10는 선속 20knots에서 CC 4 대상선의 다양한 트림 및 흘수에서 CFD를 수행하여 얻은 저항값의 분포이고 Fig. 11은 모형 시험을 통해 추정된 동일 대상선의 제동 마력 분포이다. 두 그림의 비교를 통해 알 수 있듯이 CFD의 저항값 해석만으로도 CC 4 대상선의 최적 트림은 선수 트림이 된다. 그리고 흘수 14.5m부근에서 경향이 차이가 나는 것이 보이

는데, 이는 일반적으로 모형 척도에서의 저항과 실선척도에서의 제동마력은 높은 상관도를 보이지만, 형상계수를 고려하는 3차원 실선 확장법을 사용할 경우 일부 조건에서 저항과 제동마력이 서로 다른 경향을 보일 수도 있기 때문이다. 그러나 그 차이는 미미한 수준이며, 전체적인 경향성에는 큰 영향을 주지 못한다.

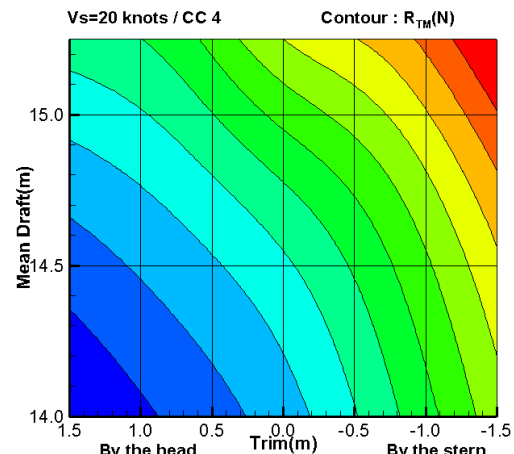


Fig. 10 Numerical R_{TM} distribution of CC 4 at 20knots

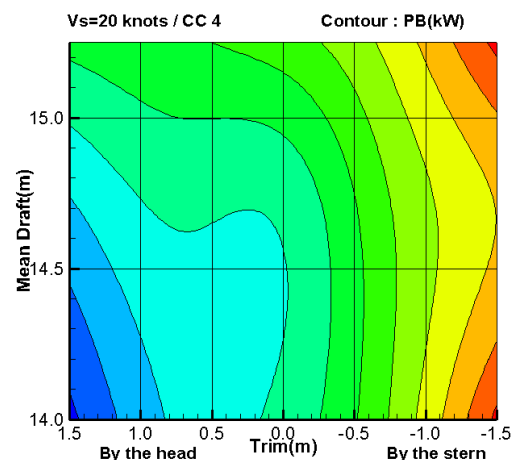


Fig. 11 Experimental BHP distribution of CC 4 at 20knots

5. 결론

본 연구의 목적은 다양한 흘수 및 트림 조건에서 CFD 저항 해석을 수행하여 트림에 따른 BHP 경향을 추정할 수 있는지를 밝히는데 있었다. 이를 위해 본 과제에서는 모형 시험과 CFD를 이용한 저항값을 비교하였고, 모형 시험의 저항값과 제동마력간 상관 관계를 분석하였다. 분석 결과 CFD를 이용한 저항값의 95%의 신뢰도를 갖는 오차구간은 $[-2.33\%, +2.42\%]$ 으로 매우 높은 정도를 제공할 수 있음을 확인하였다. 그리고 모형 시험 결과에서 저항값과 제동마력 사이의 상관 계수가 0.9 이상으로 매우 높은 상관 관계를 갖고 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 트림에

따른 CFD의 R_{TM} 경향을 통해 제동 마력의 경향을 예측할 수 있었다. 다만 저항값과 제동 마력 사이의 상관 계수에 대한 통계적 신뢰도를 평가하기 위해서는 보다 많은 경우에 대한 데이터 베이스가 확보되어야 하므로 향후 추가적인 연구가 필요하다.

Reference

- Choi, J.E. Kim, J.H. Choi, B.J. Lee, S.B. Chung, S.H. & Seo, H.W., 2013. Development of energy-saving devices for a full slow-speed ship through Improving propulsion performance. *Proceedings of the PRADS2013*, CECO, Changwon City, Korea, 20–25 October 2013.
- Hochkirch, K. & Bertram, V., 2009. Slow steaming bulbous bow optimization for a large containership. *8th COMPIT*, Budapest, Hungary, 10–12 May 2009.
- Hollenbach, U. & Reinholz, O., 2011. Hydrodynamic trends in optimizing propulsion. *Second International Symposium on Marine Propulsors - smp'11*, Hamburg, Germany, 15–17 June 2011.
- Lee, S.B. & Lee, Y.M., 2014. Statistical Reliability Analysis of Numerical Simulation to Predict Ship Resistance *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(4), pp.321–327.
- Park, D.W. Lee, S.B. Chung, S.S. Seo, H.W. & Kwon, J.W., 2013. Effect of Trim on Resistance Performance of a Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.88–94.
- Yang, J.M. & Kim, H.C., 2005. Prediction of Propulsive Performance of VLCC at Heeled and Trimmed Conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.307–314.
- Yang, J.M. Rhee, S.H. & Kim, H.C., 2006. A Study on the Effect of the Heeled and Trimmed Conditions on Propulsive Performance of VLCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(3), pp.275–284.

