

# Hybrid mesh 및 sliding mesh를 이용한 선박 저항추진 성능 시험

이 주 현,<sup>1</sup> 박 범 진,<sup>2</sup> 이 신 형<sup>\*3</sup>

## SHIP RESISTANCE AND PROPULSION PERFORMANCE TEST USING HYBRID MESH AND SLIDING MESH

Ju Hyun Lee,<sup>1</sup> Bum Jin Park<sup>2</sup> and Shin Hyung Rhee<sup>\*3</sup>

*In this study, we conducted resistance and propulsion performance test of ship composed of the Resistance Test, Propeller Open Water Test and Self Propulsion Test using the CFD(Computational Fluid Dynamics). We used commercial RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes equation) solver, as a calculating tool. The unstructured grids were used in a bow and stern of ship, having complex shape, for a convenience of generating grids, and the structured grids were adopted in a central hull and rest of hull having a relatively simple shape which is called hybrid grid method. In addition, The sliding mesh method was adopted to rotate a propeller directly in the Propeller Open Water and Self Propulsion Test. The Resistance Test and Self Propulsion Test were calculated using Volume of Fluid (VOF) model and considering a free surface. And all The three cases were applied realizable k-epsilon model as the turbulence model. The results of calculations were verified for the suitability of calculations by comparing MOERI's EFD results.*

**Key Words :** 선박성능시험(Ship Performance Test), 저항시험(Resistance Test), 프로펠러 단독성능 시험(POW test, Propeller Open Water test), 자항시험(Self Propulsion test), 하이브리드격자(Hybrid Mesh), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

근래 컴퓨터 성능의 향상으로 전산 유체 역학 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 선박 저항추진 성능 계산이 활발하게 이루어지고 있다. 더불어 WAVIS 및 FLUENT, CFX 등 여러 수치 계산 tool이 개발되어 실제 CFD를 이용한 계산 결과가 선박 설계 시 반영되고 있다.

전산 유체 역학을 이용한 선박 계산을 위해서는 먼저 선박 주위 공간에 격자를 생성하는 것이 필수적이다. 그러나 선박 및 프로펠러의 형상이 복잡하여 전산 유체 역학을 처음 접하는 사람들은 격자를 생성하는데 어려움을 겪게 된다. 이에 복

잡한 형상 주위에는 비구조 격자(unstructured grid)를 사용하고 나머지 형상이 간단한 공간에는 구조 격자(structured grid)를 사용하여 계산하는 방법이 제안된 바 있다[1].

본 논문에서는 형상이 복잡한 선수, 선미, 프로펠러 주위에는 비구조 격자를 사용하고 나머지 공간에는 구조 격자를 사용하는 hybrid 격자법을 이용하여 저항시험, 프로펠러 단독시험, 자항시험을 수행하고자 한다.

더불어 자항 시험을 계산함에 있어서 몇 가지 계산 방법이 제안된 바 있다. 먼저 프로펠러를 MRF(Moving Reference Frame) 방법으로 돌려서 계산하거나[2], 정상상태를 가정하여 프로펠러를 물체력이 분포된 판으로 모사하는 방법[3-4]이 있다. 마지막으로 프로펠러를 직접 돌려서 계산하는 sliding mesh 법이 수행된 바 있다[5]. 본 논문에서는 프로펠러를 직접 돌려서 계산하는 sliding mesh 법을 이용하여 자항시험 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 상용 RANS(Reynolds Average Navier-stokes) solver인 FLUENT를 이용하여 선박 저항추진 성능 시험인 저항시험, 프로펠러 단독시험, 자항시험을 수행하였다. 세 경우

접수일: 2010년 1월 6일, 수정일: 2010년 3월 22일,  
게재확정일: 2010년 3월 26일.

1 정희원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

2 정희원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

3 정희원, 서울대학교 해양시스템공학 연구소

\* Corresponding author, E-mail: shr@snu.ac.kr

모두 hybrid mesh를 사용하였고 프로펠러 단독 시험과 자항시험에서는 프로펠러를 직접 돌리는 sliding mesh 법을 이용하여 계산을 수행하였다. 계산 결과는 MOERI의 실험 및 타 기관의 계산 결과와 비교하여 검증하였다.

## 2. 사용 모델 및 조건

수치계산을 위하여 MOERI에서 설계한 3,600TEU 컨테이너선인 KRISO container ship(KCS)을 대상 선박으로 수행하였다. 더불어 프로펠러는 KCS 전용 프로펠러인 KP505를 사용하였다. 각각의 주요 치수는 Table 1과 Table 2와 같다.

## 3. 수학적 모델링 및 수치해석 방법

### 3.1 지배 방정식, 수학적 모델링 및 수치해석 방법

본 수치계산에서의 지배방정식과 수학적 모델링은 다음의 방정식을 만족해야하며 각각 다음과 같다.

#### 3.1.1 질량보존방정식

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \tag{1}$$

여기서 질량가중평균속도는  $\vec{v}_m$  식 (2)와 같이 정의되며,

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \tag{2}$$

혼합물(mixture)의 밀도는 식 (3)과 같다.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \tag{3}$$

Table 1 Principal particulars of KCS

| KCS                                  | Principal         |
|--------------------------------------|-------------------|
| $L_{pp}$ (m)                         | 7.2786            |
| B(m)                                 | 1.019             |
| T(m)                                 | 0.3418            |
| Wetted surface area(m <sup>2</sup> ) | 9.4379            |
| Speed(m/s)                           | 2.196             |
| Reynolds No.                         | $1.4 \times 10^7$ |

$\alpha_k$ 는 각 상(k)의 체적분율(volume fraction)이다.

#### 3.1.2 운동량보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} \\ + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}) \end{aligned} \tag{4}$$

혼합물의 점성계수는 식 (5)와 같고,

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \tag{5}$$

1차 상과 2차 상 간의 속도편차(drift velocity)  $\vec{v}_{dr,k}$ 는 식 (6)과 같이 정의 된다.

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \tag{6}$$

#### 3.1.3 에너지보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)] \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서 유효열전도계수  $k_{eff} = \sum \alpha_k (k_k + k_t)$ 이며,  $k_t$ 는 사용된 난류모델에 따라 정의되는 난류열전도계수이다. 내부 에너지  $E_k$ 는 식 (8)과 같이 정의되며,

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \tag{8}$$

비압축성인 상에 대해서는  $E_k = h_k$ 가 된다.

Table 2 Principal particulars of KP505

| KP505         | Principal |
|---------------|-----------|
| Diameter(mm)  | 250.0     |
| Ae/A0         | 0.800     |
| Hub ratio     | 0.180     |
| No. of Blades | 5         |
| Section       | NACA66    |

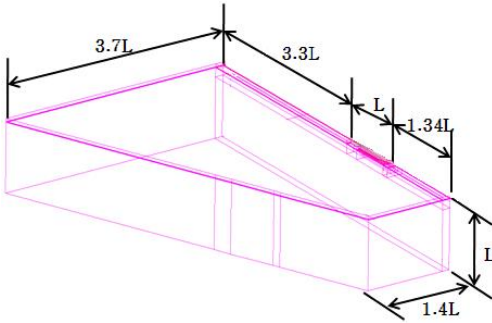


Fig. 1 Domain size for resistance test

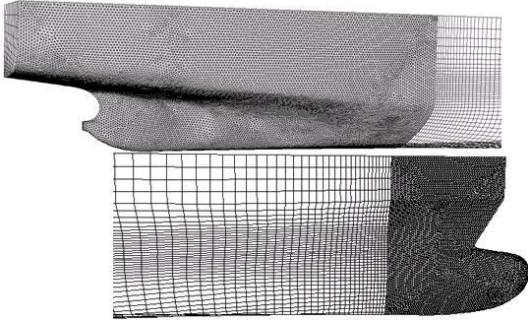


Fig. 2 Hull surface mesh using Hybrid mesh

3.1.4 2차상에 대한 체적분율방정식

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{gp} - m_{pq}) \tag{9}$$

유동은 unsteady로 implicit법으로 시간적분을 하였다. 난류 모델은 세 계산 모두 two equation 모형인 realizable k-epsilon 으로 non-equilibrium wall function을 사용했다. 저항시험에서와 저항시험에서의 속도 압력 연성에 대한 scheme은 자유 수면을 고려하였기 때문에 지배방정식인 continuity equation, momentum equation, species transport를 하나의 set of equation 으로 푸는 coupled로 계산하였다. 더불어 저항시험과 저항시험에서 volume fraction은 HRIC법으로 이산화하였다. 프로펠러 단독 성능 시험은 SIMPLEC를 사용하였다. 압력항은 세 경우 모두 PRESTO! 방법으로 이산화 하였고, momentum, turbulent kinetic energy와 turbulent dissipation rate에 대해서는 2nd order upwind 방법으로 이산화 하였다.

3.2 격자 생성 및 경계조건

수치계산을 위하여 저항시험, 프로펠러 단독시험, 저항시험

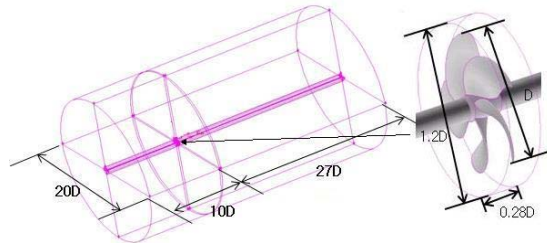


Fig. 3 Domain size for propeller open water test

에 대해서 각각의 격자를 생성하였다.

3.2.1 저항시험

저항시험을 위한 전체 domain의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

저항 시험을 위한 domain size를 보면, 선체의 길이를 L로 보았을 때 앞쪽으로 1.34L, 뒤쪽으로 3.3L로 주었다. 옆은 사다리꼴 형상으로 구성하였는데, 앞쪽 폭은 1.4L, 뒤쪽 폭은 3.7L로 주었다. 높이는 선박의 길이와 동일하게 주었다. 더불어 free surface를 고려하였기 때문에 설계 흘수로부터 0.047L 만큼 높게 잡았다.

경계조건은 앞쪽 평면 및 왼쪽의 경사진 평면을 inlet으로 주었고, 뒤쪽의 평면은 outlet으로 주었다. 나머지 옆면은 symmetry condition으로 주었다.

선체 표면의 격자 형상은 Fig. 2와 같다. 그림을 보면 형상이 복잡한 선수와 선미 부분은 unstructured grid로, 가운데 부분은 structured grid를 사용하였다. 선수는 길이방향으로 L<sub>WZ</sub>의 약 8%, 선미는 L<sub>WZ</sub>의 약 25% 부분을 unstructured grid로 생성 하였다. 이를 위하여 unstructured grid와 structured grid가 만나는 부분을 interface로 주어서 non conformal interface로 정의하여 주었다.

저항시험에서 사용한 총 격자 개수는 선수, 선미 부분의 unstructured grid는 97만 여개, structured grid는 59만 여개, 총 156만 여개의 격자를 사용하였다.

3.2.2 프로펠러 단독 시험

프로펠러 단독시험을 위한 전체 domain의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다.

프로펠러 단독 시험을 위한 격자를 보면 전체적으로 실린더 형상으로 구성하였다. 프로펠러 지름(0.25 m)을 D라고 했을 때 실린더의 지름은 20D, 프로펠러 앞쪽은 10D, 뒤쪽은 27D로 넉넉하게 주었다. 더불어 sliding하는 원통은 1.2D로, 원통의 폭은 0.28D로 주었다.

경계조건은 앞쪽과 뒤쪽 원 평판을 각각 inlet과 outlet으로 주고 나머지 옆면은 모두 symmetry condition으로 주었다. 통

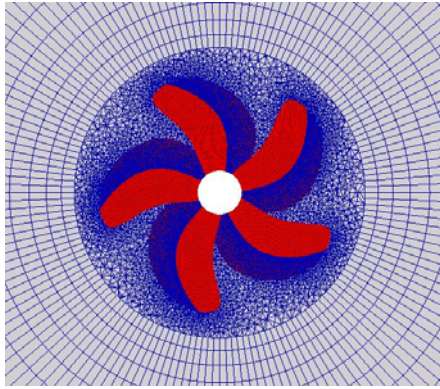


Fig. 4 Propeller mesh using hybrid mesh

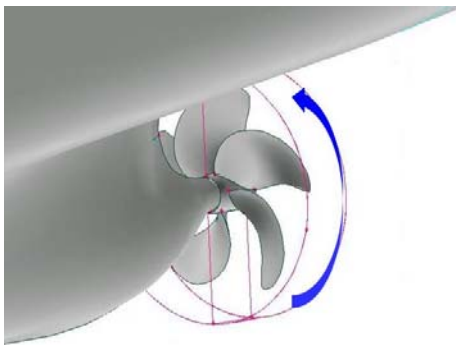


Fig. 5 Configuration of sliding mesh

상의 예를 따라서 회전축이 프로펠러를 관통하도록 하였다. 그러나 이러한 축은  $K_p$ 와  $K_Q$ 의 값에는 영향을 미치지 않음이 알려져 있다. 프로펠러 표면 격자 및 주위 격자 형상은 Fig. 4와 같다. 그림을 보면 프로펠러 주위의 원통은 unstructured grid를 사용하였고, 나머지 바깥쪽 부분은 structured grid를 사용하였다. 이도 저항시험과 마찬가지로 만나는 부분을 interface로 주어서 non conformal interface로 정의하여 주었다. 더불어 프로펠러 면 위로 4개의 prism layer를 올려 주어서 프로펠러 면 부근에 균일한 두께의 격자를 배치하였다.

3.2.3 저항 시험

저항 시험은 저항시험과 동일한 형상의 domain과 치수, 경계조건을 사용하였다. 다른 점은 저항시험에서 반쪽만 계산하던 것을 저항시험에서는 양 쪽으로 확장하여 주었다. 그리고 선미 뒤쪽에 프로펠러를 넣어주었다. Fig. 5와 같이 propeller를 다른 fluid zone으로 정의하여서 프로펠러를 sliding mesh 법으로 계산하였다.

저항 시험에서 사용한 격자 개수는 선미, 선수, 프로펠러 주위에는 unstructured grid 329만 여개를 사용하였고, 나머지

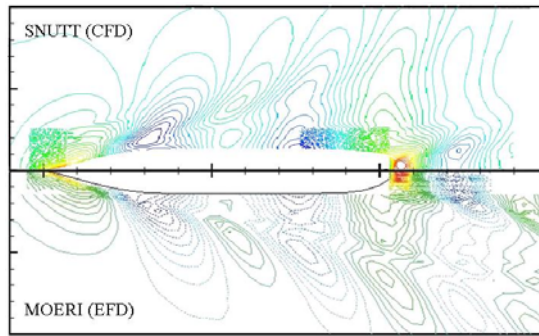


Fig. 6 Comparison of Wave Patterns

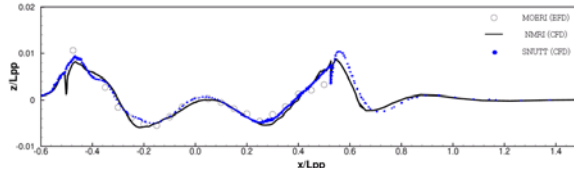


Fig. 7 Comparison of Wave profile

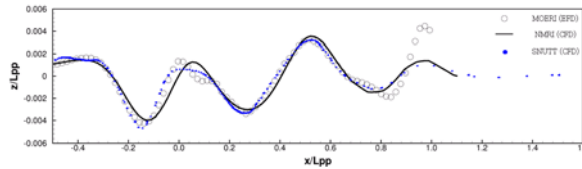


Fig. 8 Comparison of Wave cut at  $y/L_{pp}=0.1509$

부분에는 structured grid를 118만 여개 사용하였다. 그래서 총 447만 여개의 격자를 사용하여 계산을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 저항 시험 결과

Hybrid mesh를 사용하여 저항 시험을 한 결과는 Table 3과 같다. 계산 결과는 계산의 검증을 위하여 MOERI의 fixed condition에서의 EFD 결과와 MOERI의 WAVIS 코드와 비교하여 보았다. 결과는 잉여저항 계수인  $C_R$ 값과 전저항 계수인  $C_T$ 값을 비교하였고 각각의 값은 MOERI EFD값을 기준으로 한 오차율을 표시하였다. 마찰저항 계수  $C_f$ 값은 1957년 ITTC

Table 3 Comparison of the resistance coefficients ( $C_R \times 104, C_T \times 103$ )

|       | SNUTT(CFD)     | MOERI(EFD) | MOERI(WAVIS)  |
|-------|----------------|------------|---------------|
| $C_R$ | 7.197 (-1.63%) | 7.316      | 7.676 (4.92%) |
| $C_T$ | 3.548 (-0.33%) | 3.560      | 3.596 (1.01%) |

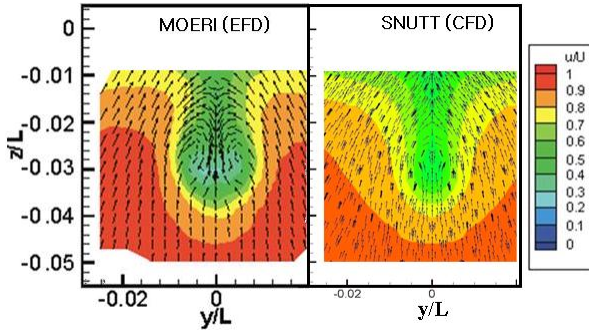


Fig. 9 Comparison of wake plane at  $x/L_{PP}=0.491$

식을 이용하였다. 계산 결과를 보면 다른 기관의 실험 및 계산 결과와 비교했을 때 약 1%차이로 비교적 비슷한 결과를 보였다.

다음으로 hybrid mesh를 이용한 저항 시험 계산에서 자유수면이 잘 구현되었는지를 확인하기 위하여 wave patterns, 선체에서의 wave profile 및  $y/L_{PP} = 0.1509$ 에서의 wave cut을 MOERI의 실험결과, NMRI의 계산 결과와 비교하여 보았다.

먼저 Fig. 6의 diverging wave pattern을 보면 MOERI의 실험과 비교했을 때 bow wave와 transome wave가 잘 예측되었음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7의 wave profile에서는 선미파를 제외하고 실험 및 NMRI의 계산결과와 비슷하게 계산되었다. Fig. 8의 wave cut을 보면, 다른 곳에서는 비교적 잘 맞았지만 선미부분에서는 실험보다 파가 훨씬 적게 발생하였다. 그러나 이는 NMRI 계산에서도 비슷한 경향을 보였다. 위의 계산 비교를 통하여 hybrid 격자를 이용하여 계산한 자유수면 구현 결과가 비교적 잘 예측되었음을 확인할 수 있다. 마지막으로  $x/L_{PP}=0.4911$ 에서의 반류분포를 역시 MOERI의 실험결과와 비교하여 보았는데 그 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다.

반류 분포 계산 결과 역시 MOERI의 실험 결과와 비교적 비슷한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 다만 비정렬 격자를 사용하였기 때문에 sum dissipation의 영향으로 중앙에서 화살표가 돌아가는 형상이 잘 구현되지 못하였다. 또한 격자

Table 4 Comparison of POW test ( $K_T$ )

| $K_T$ |                    |            |                 |
|-------|--------------------|------------|-----------------|
| J     | $R_{it}$           | MOERI(EFD) | SNUTT(CFD)      |
| 0.1   | $1.45 \times 10^5$ | 0.4763     | 0.4642 (-2.53%) |
| 0.3   | $4.33 \times 10^5$ | 0.3814     | 0.3829 (0.39%)  |
| 0.5   | $7.22 \times 10^5$ | 0.2763     | 0.2744 (-0.68%) |
| 0.7   | $1.01 \times 10^6$ | 0.1770     | 0.1786 (0.92%)  |
| 0.9   | $1.30 \times 10^6$ | 0.0757     | 0.0721 (-4.67%) |

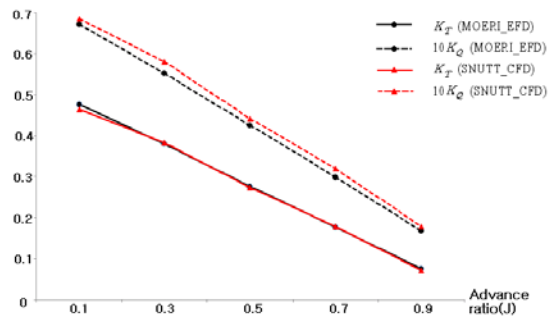


Fig. 10 Comparison of POW test ( $K_T$  &  $K_Q$ )

생성 시 stern bulb 주위의  $y+$ 가 낮아지는 저속구간에 대한 고려를 하지 않아 저속구간에서 경계층이 과도하게 생성되어 실험보다 과도한 반류 분포가 나타나는 것으로 보인다.

#### 4.2 프로펠러 단독시험 결과

CFD를 이용한 저항 시험 이후에 hybrid mesh 및 sliding mesh를 이용하여 프로펠러 단독시험(Propeller Open Water test)을 수행하였다.

계산은 프로펠러가 회전하는 rps를 14로 고정하고 유속을 변화시켜 가면서 계산을 수행하였다. 전진비 기준으로 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 구간에서 계산을 하였고, 이때의 Reynolds 수는  $1.45 \times 10^5 \sim 1.30 \times 10^6$  이다. 계산한 결과는  $K_T$ 와  $K_Q$  값을 MOERI의 실험결과와 비교하여 보았다.  $K_T$  값 계산 결과는 Table 4에서,  $K_Q$  값 계산 결과는 Table 5 이를 그래프로 비교한 결과는 Fig. 10에서 보여준다.

계산한 결과를 보면,  $K_T$ ,  $K_Q$  값 모두 MOERI 실험과 비교했을 때 10% 이내로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 특히  $K_T$  값은 전진비 0.1과 0.9를 제외하고 나머지 구간에서 1% 이내의 결과를 보여주었다.

실제 계산을 수행할 때 처음에 낮은 전진비에서 CFD 계산 결과와 실험 결과가 잘 맞지 않았다. CFD 계산 결과가 낮게 나오는 경향을 보였다. 이 문제는 프로펠러 면에 prism layer를 깔아  $y+$ 를 약 80정도로 비교적 일정하게 맞추어 줌으로써

Table 5 Comparison of POW test ( $K_Q$ )

| $10 K_Q$ |                    |            |                |
|----------|--------------------|------------|----------------|
| J        | $R_{it}$           | MOERI(EFD) | SNUTT(CFD)     |
| 0.1      | $1.45 \times 10^5$ | 0.6720     | 0.6595 (2.08%) |
| 0.3      | $4.33 \times 10^5$ | 0.5527     | 0.5732 (5.05%) |
| 0.5      | $7.22 \times 10^5$ | 0.4258     | 0.4583 (3.62%) |
| 0.7      | $1.01 \times 10^6$ | 0.2992     | 0.3316 (7.12%) |
| 0.9      | $1.30 \times 10^6$ | 0.1682     | 0.1929 (6.30%) |

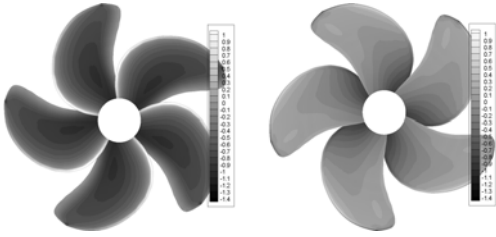


Fig. 11 Pressure distribution at J=0.7; left: back side, right: face side

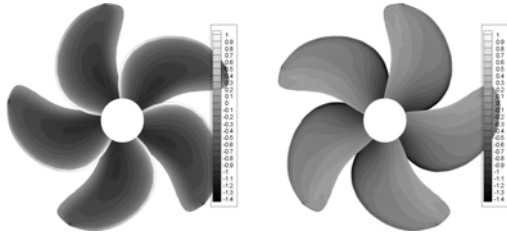


Fig. 12 Pressure distribution at J=0.9; left: back side, right: face side

해결할 수 있었다.

Hybrid mesh 및 sliding mesh를 이용하여 계산한 압력 분포 결과( $C_p = P_{static} / \frac{1}{2} \rho (nD)^2$ )는 Fig. 11,12와 같다. 결과는 자항 시험 시 해당될 것이라고 예상되는 전진비인 0.7과 0.9에서 back side와 face side에서의 압력 분포를 보여준다. 위의 압력 분포 그림을 통해서 압력면과 흡입면의 차이로 추력이 발생 되는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 자항 시험 결과

프로펠러 단독 시험 계산에서 sliding mesh를 이용한 프로펠러 회전 계산이 실험과 비교했을 때 비교적 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 그래서 다음으로 선체 뒤에서 프로펠러를 직접 돌리는 sliding mesh 법을 이용하여 자항 시험 계산을 수행하였다.

자항시험은 먼저 프로펠러를 돌리지 않고 저항시험과 동일

Table 6 Calculation results of three rps cases

| rps  | $J_s$  | $K_T$  | $K_Q$  | error                  |
|------|--------|--------|--------|------------------------|
| 9.0  | 0.9761 | 0.1452 | 0.0281 | $5.88 \times 10^{-4}$  |
| 9.5  | 0.9247 | 0.1721 | 0.0307 | $-9.92 \times 10^{-5}$ |
| 10.0 | 0.8785 | 0.1903 | 0.0331 | $-3.95 \times 10^{-4}$ |

Table 7 Result parameters of self propulsion test

| rps   | $K_T$  | $K_Q$   |
|-------|--------|---------|
| 9.592 | 0.1700 | 0.03110 |

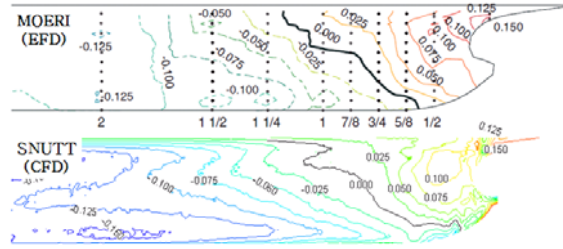


Fig. 13 Comparison of hull surface pressure distribution

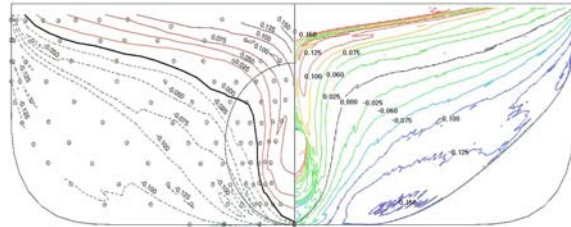


Fig. 14 Comparison of pressure distribution(port side)

하게 유동을 정상상태로 분포 시키고 수렴이 다 되면 가장 낮은 회전속도부터 프로펠러를 돌려서 계산하였다. 프로펠러를 돌릴 때 time step size는 돌아가는 cell이 바깥쪽의 고정된 cell을 1개 넘지 않도록 고려하여 정해주었다.

회전속도는 시작 rpm을 정하고 실험과 동일하게 3개의 점에서 계산을 수행하고 이를 선형보간하여 자항점을 찾았다. 자항점은 계산이 모형선 scale에서 수행되었기 때문에 모형선과 실선 사이의 점성력의 차이를 보전하기 위하여 예인력( $F_{D_0}$ )을 고려하여 계산하였다.

프로펠러는 회전속도 9.0 rps, 9.5 rps, 10.0 rps에서 수행되었고 그 계산 결과는 Table 6과 같다. 여기서 오차값은  $(R_T - T - F_{D_0}) / 0.5 \rho U^2 S_M$ 이다. 3개의 case에서 구한 결과를 이용하여 선형보간으로 rps,  $K_T$ ,  $K_Q$ 를 구한 결과는 Table 7과 같다.

Table 8 Computed self-propulsion parameters

| Organization   | 1-t    | 1-w <sub>t</sub> | $\eta_0$ | $\eta_r$ | J     | n     | $\eta_D$ |
|----------------|--------|------------------|----------|----------|-------|-------|----------|
| NMRI (EFD)     | 0.835  | 0.792            | 0.682    | 1.011    | 0.728 | 9.500 | 0.740    |
| MOERI (WAVIS)  | 0.846  | 0.779            | 0.671    | 1.023    | 0.729 | 9.380 | 0.746    |
| HSVA (COMET)   | 0.865  | 0.789            | 0.667    | 0.981    | 0.725 | 9.560 | 0.717    |
| SVA (CFX5)     | 0.910  | 0.765            | 0.614    | 1.007    | 0.708 | 9.500 | 0.618    |
| OPU (FLOWPACK) | 0.852  | 0.789            | 0.631    | 1.074    | 0.718 | 9.530 | 0.732    |
| SNUTT (CFD)    | 0.8325 | 0.773            | 0.613    | 1.004    | 0.708 | 9.592 | 0.665    |

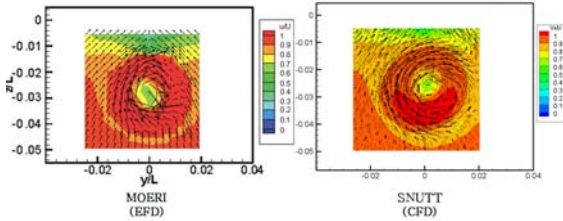


Fig. 15 Comparison of wake plane at  $x/L_{PP}=0.491$

다음으로 선체의 선체 표면의 압력분포, 선체 port side에서의 압력분포 및  $x/L_{PP}=0.4911$ 에서의 반류 분포를 비교하여 보았다. 선체 표면의 압력 분포는 Fig. 13, 선체 port side에서의 압력분포는 Fig. 14에서,  $x/L_{PP}=0.4911$ 에서의 반류 분포는 Fig. 15에서 보여준다. 압력 분포와 반류분포는 MOERI의 실험 결과와 비교해 보았다.

그림에서 선체 압력분포, 반류분포의 비교 결과를 보면 CFD 계산 결과가 실험 결과와 비교적 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 특히 반류 분포에서 프로펠러가 회전함에 따라 유동이 회전되는 것과 프로펠러 작동에 의한 선체표면의 압력 변동이 MOERI의 실험결과와 비교했을 때 잘 표현되었음을 확인할 수 있다.

앞서 저항시험, 프로펠러 단독 시험을 모두 수행하였으므로 저항시험의 결과를 이용하여  $\eta_D$ 를 구할 수 있다.  $\eta_D$ 를 구하기 위한 저항 계수들을 구하고 이 결과를 NMRI의 실험과 MOERI, HSVA, SVA, OPU의 CFD 계산 결과와 비교하였다. 그 결과는 Table 8과 같다.

표를 보면 hybrid mesh 및 sliding mesh를 이용하여 계산한 결과가 NMRI의 실험이나 다른 기관의 계산과 비교했을 때  $\eta_D$  값이 더 작게 나온 것을 볼 수 있다. 그리고 다른 실험이나 계산 보다 더 높은 rps에서 저항점에 이르는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 POW test 결과에서 보듯이 높은 전진비에서  $K_T$  값이 실험 보다 작게 나오고,  $K_Q$  값은 더 크게 나와서 결국 프로펠러 단독 효율이 작게 나와서  $\eta_D$  값이 작게 나온 것으로 보여 진다. 프로펠러의 격자를 더 개선하여 POW test 결과가 개선된다면 보다 나은 저항 시험 결과가 얻어 질 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상을 가진 선수, 선미, 프로펠러

주위에는 비구조 격자를 사용하고 나머지 형상이 간단한 공간에는 구조 격자를 사용한 hybrid mesh법과 격자를 직접 돌리는 sliding mesh법을 이용하여 저항 시험, 프로펠러 단독 시험, 저항 시험을 수행하였다.

계산 결과 저항 시험과 프로펠러 단독 시험에서는 MOERI의 실험 결과와 비교했을 때 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 다만 반류의 분포를 실험과 더 정확하게 맞추기 위해서는 격자의 질이나 점성모델 등에 대한 연구가 추후 진행될 필요가 있다. 저항 시험의 경우 다른 기관의 실험이나 계산에 비해서 더 높은 rps에서 저항점이 이르렀고 또한  $\eta_D$  값도 작게 나오는 경향을 보였다. 이는 높은 전진비에서 계산에서의 프로펠러 효율이 실험에서의 효율보다 작게 나왔기 때문이다.

추후 프로펠러 주위의 격자를 개선하여 프로펠러 단독 시험에서 계산 결과를 실험의 결과와 비슷하게 맞추면 sliding mesh를 이용한 저항 시험 계산 결과가 개선될 것으로 보여 진다.

## 후 기

본 연구는 BK 인력양성단을 위한 현대중공업의 지원과 서울대학교 LRETC의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] 2009, 이주현, 박범진, 설동명, 이신형, 전동수, 지혜련, 유민철, "Hybrid Mesh Generation for Prediction of Hull Resistance of POD Propulsion Cruis Ship," 2009년도 대한조선학회 추계학술대회.
- [2] 2004, 박제주, 최영복, 황윤식, "프로펠러 효과에 의한 선박 주위의 점성 유동 특성에 관한 연구," 2004년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.583-588.
- [3] 1994, Stern, F., Kim, H.T., Toda, Y., Kerwin, J. and Jessup, S., "Computation of Viscous Flow Around Propeller-Body Configuration: Series 60. CB=0.6 Ship Model," *Journal of Ship Research*, Vol.38, No.2, pp.137-157.
- [4] 2004, 김진, 박일룡, 반석호, 안해성, 이영연, "추진기를 고려한 KLNG(138K) 선의 난류 유동 해석," 2004년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, p.526.
- [5] 2006, 김정중, 백광준, 이용철, 김형태, "선박 저항 상태 점성 유동 해석법에 관한 연구," 2006년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.548-557.