



공기윤활에 의한 액화천연가스운반선의 마찰저항저감 평가 및 공기 분사부 배치에 대한 연구

김희택¹ · 김형태^{2,†} · 김현조¹ · 김정중³
삼성중공업¹
충남대학교 선박해양공학과²
선박해양플랜트연구소³

Study on the Evaluation of Frictional Drag Reduction by Air Lubrication and the Arrangement of Air Injection Parts for a Liquefied Natural Gas Carrier

Hee-Taek Kim¹ · Hyung-Tae Kim^{2,†} · Hyun-Joe Kim¹ · Jung-Joong Kim³
Samsung Heavy Industries Co., Ltd.¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University²
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)³

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.

Brake Horse Power (BHP) reduction ratios by air injection to the underside of the hull surface in an actual ship are predicted using an unstructured finite-volume CFD solver and compared with the sea trial results. In addition, air lubrication system installed on the existing vessel is investigated to find a good solution for additional drag reduction. As a results, it is found that the thickness of the air layer should be minimized within a stable range while securing the area covered by the air layer as much as possible. Furthermore, the amount of frictional drag reduced by air injection is found to be independent of surface roughness and still effective on rough surface. Based on the results of this study, it is expected that systematic and reliable air lubrication system can be designed and evaluated using the proposed method.

Keywords : Air lubrication(공기윤활), Frictional drag reduction(마찰항력감소), Liquefied natural gas carrier(액화천연가스운반선), Air layer thickness(공기층 두께), Rough surface(거친 표면)

1. 서론

선박 운항 중에 발생하는 온실가스에 대한 배출 규제가 아니더라도, 친환경 선박 개발은 오래 전부터 조선 산업의 중점 과제로 다루어져 왔다. 최근 유가가 많이 낮아지기는 했지만, 일반 상선의 연간 유류비는 선가의 10%에 이를 만큼 큰 비중을 차지하여 해운사의 경영 지표에 지대한 영향을 미친다. 이 때문에, 해운사들은 유류비 지출을 최대한 줄이기 위해서 저속 운항도 마다하지 않고 있다. 더불어, 국제해사기구(IMO)의 환경규제 강화와 배출규제지역(Emission Control Area, ECA) 확대 추세에 발맞춰 친환경 선박에 대한 관심은 더욱 높아질 수밖에

없다. 선박의 에너지 효율을 제고하기 위한 가장 근본적인 방법은 실제 운항 항로의 환경을 고려하여 상부구조물을 포함한 선박의 전체 저항을 최소화하는 선형을 개발함과 동시에 추진기의 효율 향상을 통해 속도-마력 성능 개선을 극대화하는 것이다. 또한, 선체 외부에 설치하여 그 주위 유동의 에너지를 이용하는 에너지 절감장치(Energy Saving Device, ESD)를 개발하여 적용하는 것도 연료 소모량 추가 절감을 위한 또다른 대안이 되고 있다.

에너지 절감장치는 크게 선체저항 감소장치와 추진효율 향상 장치로 구분할 수 있다. 대표적인 선체저항 감소장치의 예로서 삼성중공업에서 개발한 Samsung Advanced Vibration and

Energy Reduction(SAVER) Fin을 들 수 있다. SAVER Fin은 추진기로부터 멀리 떨어진 선체 전방 외판에 설치하여 생성시킨 와류 제어를 통해 선미 부근의 압력저항 성분을 감소시켜 준다. 이와 더불어, 추진기로 유입되는 유속 분포의 균일화를 통해 변동 압력을 줄여주는 데에도 도움을 준다. 추진효율 향상장치는 추진기로 유입되는 유동을 제어하여 효율을 향상시키거나, 추진기 후방의 선회류(swirling flow)를 이용하여 부가적인 추력을 발생시키는 장치로서 Pre Swirl Stator(PSS), Ducted PSS, Propeller Boss Cap Fin(PBCF) 및 Rudder Bulb(RB) 등이 실선에 적용되고 있다. 선종과 설계 속도에 따라 다소 차이는 있지만 유조선과 컨테이너선 같은 상선의 경우에는 마찰저항이 전체저항의 약 70~80%를 차지 (Larsson et al., 2010)하므로, 최근에는 마찰저항을 감소시키는 방법이 다른 ESD보다 더 효과적인 에너지 절감방안으로 떠오르고 있다. 마찰저항을 줄이기 위한 방법으로는 탄성피막(compliant wall)을 사용하여 난류로의 전이를 지연시키는 방법, 리블렛(riblet) 혹은 Large Eddy Break Up(LEBU) 장치로 벽 근처 유동의 난류 구조를 변화시키는 방법, 난류 경계층 내에 미소기포(micro-bubbles) 또는 고분자 폴리머(polymer) 용액 등을 주입하여 표면 마찰력을 줄이는 방법, 그리고 선체 바닥면에 공기를 주입해서 공기층(air layers 혹은 ventilated cavities)을 생성하여 접수표면적을 감소시키는 공기윤활(air lubrication) 방법 등이 있다. 하지만, 탄성피막법은 효과 검증 방안 문제, 리블렛과 LEBU는 제작 및 해양 미생물 부착 등의 방오 대책 문제, 미소기포법은 기포의 크기 조절 문제, 그리고 폴리머 주입법은 고비용 및 환경오염 문제 등으로 선박에 실제로 적용하기 쉽지 않다. 상기와 같은 이유로, 공기윤활이 실용적인 방법으로서 다시 각광을 받고 있으며 최근 다수의 실선 적용 사례가 보고되고 있다.

America Bureau of Shipping(ABS)의 Air Lubrication Technology (ABS, 2019)에 따르면, 2018년까지 약 23척의 선박에 공기윤활장치가 적용된 것으로 알려졌다. 또한, 최근에는 액화천연가스운반선(Liquefied Natural Gas Carrier, LNGC), 컨테이너선 및 크루즈선에 이르기까지 적용 선박의 종류가 다양해지고 있으며, 선박의 크기도 점차 증가하는 추세임을 밝히고 있다. 공기윤활시스템과 관련하여 대표적인 장치는 일본 미쓰비시중공업의 Mitsubishi Air Lubrication System(MALS), 영국 Silverstream Technologies의 Silverstream 그리고 삼성중공업의 SAVER Air 등을 들 수 있다. 공기윤활시스템은 일반적으로 제어기, 공기 압축기, 배관 계통 및 공기 분사부로 구성된다. 공기 압축기는 배관 내의 압력 손실을 최소화하기 위해 공기 분사부와 가까운 곳에 배치하고, 공기 압축기에서 나온 공기는 주 배관을 통해 이송되며 주 배관에서 분기된 각각의 보조 배관을 통해 개별 공기 분사구로 공기를 이송하는 방법을 채택하고 있다. 또한, 공기 분사부는 공기층이 유동 흐름을 따라 선체 바닥면을 최대한 많이 덮을 수 있도록 일반적으로 선수 부근 바닥에 폭 방향으로 배치되는 특징을 가지고 있다.

공기윤활시스템에 의한 실선 성능 개선 효과는 시운전 및 실

운항 데이터 분석을 통해 다수 보고되고 있다. 미쓰비시중공업은 MALS를 NYK-Hinode Line의 Module Carrier 2척에 적용하고 실선 시운전을 통해서 최대 13%의 연료절감효과를 보고한 바 있다 (Mizokami et al., 2010; Tanaka et al., 2011). 영국의 Silverstream Technologies는 독자 개발한 공기윤활시스템을 40K DWT 제품운반선에 설치하고 해상 시운전 및 9개월 동안 수집된 운항 데이터 분석을 통해 약 4.5%의 연료절감효과를 발표하였다 (Silberschmidt et al., 2016). 또한, 핀란드의 Foreship은 Royal Caribbean International Company가 운용해 온 크루즈 선박에 개조 공사를 통해 공기윤활시스템을 설치하고 약 7~8% 연료절감효과를 발표한 바 있다 (Foreship, 2016). 삼성중공업은 중량물운반선(Heavy Cargo Carrier, HCC)과 액화천연가스운반선에 독자 개발한 SAVER Air를 설치하고, 시운전 및 운항 데이터 분석을 통해 각각 8.8% 및 4~5%의 연료절감효과가 있음을 확인한 바 있다 (Lee et al., 2017). 최근, Mediterranean Shipping Company(MSC)의 23,000TEU급 초대형 컨테이너선 및 유럽 선사인 Celsius Tanker가 발주한 2척의 액화천연가스운반선에 SAVER Air를 추가로 장착하고 그 효과를 지속적으로 입증해 나아가고 있다. 대우조선해양은 그리스 Maran Gas Maritime으로부터 수주한 174K급 액화천연가스운반선에 자체 개발한 공기윤활시스템인 DSME ALS를 설치하고 시운전을 통해 5%의 연료절감효과가 있음을 발표한 바 있다.

이상의 실선 적용 사례를 통해, 연료 소모량을 줄이는데 있어 공기윤활이 효과적인 방법임이 입증되었다. 하지만, 시운전 및 실 운항의 특성상, 공기윤활시스템에 의한 효과는 해당 선박의 연료 소모율에 근거하여 판단할 수밖에 없기 때문에, 주입된 공기의 거동 특성과 관련한 주요 정보를 실선 운용 사례에서 확보하기는 현실적으로 매우 어려울 수밖에 없다. 이러한 측면에서 CFD를 활용한 접근은 모형과 실선 간의 축척 영향뿐만 아니라, 다양한 분석 정보를 제공하므로 실선 스케일에서의 공기윤활에 관한 핵심 기제와 현상을 이해하는데 유용한 수단이 될 수 있다.

본 연구에서는 삼성중공업에서 건조하여 2010년에 인도한 액화천연가스운반선을 대상으로 Kim et al. (2019)에 의해 우수성이 확인된 Eulerian Multi-Phase(EMP) 모델을 활용하여, 공기윤활시스템을 설계하는데 있어 가장 중요한 항목인 마찰저항 감소 효과에 대해 평가 및 확인하고자 하였다. 이후 내용은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 수치해석 방법에 대해 간략히 기술하고, 3장에서는 대상 선박 및 공기 분사부 배치 정보, 격자계 구성 및 경계 조건 등에 대해 기술하였다. 4~6장에서는 쌍축 액화천연가스운반선을 대상으로 EMP 모델을 적용하여 소요마력 또는 마찰저항감소 효과를 평가한 후, 그 결과에 대해 기술하였다. 마지막으로 7장에서는 본 연구의 결과를 바탕으로 결론을 기술하였다.

2. 수치해석법

본 연구에서는 공기윤활에 의한 마찰저항 감소량 평가에 있

어, 감소 효과를 과대 추정하는 VOF 모델과 달리 합리성이 확인된 EMP 모델 (Kim et al., 2019)을 적용하였다. EMP 모델은 2상 유체 간의 상호침투가 허용되는 연속체로 가정하고 각각의 상들은 독립적인 운동량 및 연속방정식 군으로 표현된다. 연속방정식은 식 (1)과 같다. 여기서, α_k 와 ρ_k 는 k 상의 체적분율과 밀도, \vec{u}_k 는 k 상의 속도, N은 상의 전체 개수를 나타내며, \dot{m}_{pq} 는 상 p에서 상 q로 물질이 전달되는 비율을 의미하는 것으로 질량보존에 의해 식 (2)를 만족하여야 한다. 운동량방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 T_k 는 k 상의 응력텐서를 의미하며, \vec{M}_K 는 상간의 운동량 전달 항으로 식 (4)와 같이 각 상들이 서로에게 가하는 힘의 합으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pq}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot \alpha_k (T_k) + \alpha_k \rho_k g + \vec{M}_K \quad (3)$$

$$\vec{M}_K = \vec{M}_D + \vec{M}_L + \vec{M}_{TD} + \vec{M}_{WL} + \vec{M}_{VM} \quad (4)$$

\vec{M}_D 는 항력(drag force), \vec{M}_L , \vec{M}_{TD} , \vec{M}_{WL} 는 각각 양력(lift force), 난류분산력(turbulent dispersion force), 벽면윤활력(wall lubrication force)이고 \vec{M}_{VM} 은 가상질량력(virtual mass force)을 의미한다. \vec{M}_D 는 분산상(dispersed phase)의 운동과 반대방향으로 작용하는 힘을 고려하기 위한 항으로 식 (5)와 같이 정의된다. 여기서, ρ_c 는 연속상의 밀도, D_b 는 공기방울 직경, α_d 는 분산상의 체적분율, 그리고 \vec{u}_r 은 상대속도로서 $\vec{u}_c - \vec{u}_d$ 와 같이 정의된다. 이 때, 하첨자 c는 연속상, d는 분산상을 의미한다. C_D 는 항력계수(drag coefficient)로서 Schiller and Naumann (1933)이 제안한 모델을 사용하였다. 이 모델은 구형의 고체 입자, 물방울 및 작은 직경의 기포에 대해 적용할 수 있는 방법으로 알려져 있다. \vec{M}_L 은 연속상의 속도 회전 구배에 의해 분산상에 작용하고 횡 방향으로 밀어 올리는 힘을 고려하기 위한 항으로 식 (6)과 같이 정의된다. 여기서, C_L 은 양력계수(lift coefficient)로서 Tomiyama et al. (2002)이 제안한 모델을 적용하였다. 이 식은 실험에서의 단일 기포 궤적을 기반으로 제안되었으며 큰 규모의 변형 가능한 기포에 대한 양력계수를 예측할 수 있는 모델로 알려져 있다. \vec{M}_{TD} 는 연속상의 속도에 기인하여 발생하는 난류 변동에 의한 힘을 고려하기 위한 항으로 식 (7)과 같이 정의된다. 여기서, A_{cd}^D 는 평균 선형화 항력계수(mean linearized drag coefficient), \vec{V}_{TD} 는 상대 드리프트 속도로 식 (8)과 같이 정의된다. 이 때, D_{cd}^{TD} 는 텐서 확산 계수로 연속상의 난류 확산으로부터 근사치를 구한다. \vec{M}_{WL} 은 분산상의 체적분율이 벽으로부터 떨어지도록 인위적인 힘을 가해주

는 항으로 식 (9)와 같이 정의된다. 여기서, y_w 는 벽으로부터 떨어진 거리, \vec{n} 은 벽에서 가장 가까운 지점에서 바깥쪽으로 향하는 법선단위를 의미한다. \vec{V}_{rll} 은 벽에 평행한 슬립 속도 요소에 근거한 속도 척도로서 식 (10)과 같이 정의된다. 한편, C_{WL} 은 역 길이(inverse length) 함수로 Antal et al. (1991)이 제안한 모델을 적용하였으며 식 (11)과 같이 정의된다. 본 연구에서는 C_{w1} 및 C_{w2} 에 대해 각각 -0.01, 0.01을 적용하였다. 분산상이 연속상에 의해 가속될 때 나타나는 효과를 고려하기 위한 항인 \vec{M}_{VM} 은 식 (12)와 같이 정의된다. 여기서, 우변 항의 Dv/Dt 는 가상질량에 대한 가속도 항으로서 일정한 질량 입자의 속도 변화율에 기반하며, C_{VM} 은 가상질량 계수로서 구형 입자의 표준 계수 0.5를 기반으로 하는 구형 입자 방법(spherical particle method)을 표준으로 채택하였다. 한편, 각 항들에 대한 영향도 조사 결과 (Kim et al., 2020)를 토대로 \vec{M}_{VM} 항은 해석의 수렴성과 해의 정도 예측에 있어 적합하지 않다고 판단하여 본 연구에서는 최종적으로 고려하지 않았다.

$$\vec{M}_D = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_c}{D_b} |\vec{u}_r| \vec{u}_r \alpha_d \quad (5)$$

$$\vec{M}_L = C_L \alpha_d \rho_c [\vec{u}_r \times (\nabla \times \vec{u}_c)] \quad (6)$$

$$\vec{M}_{TD} = A_{cd}^D \vec{V}_{TD} \quad (7)$$

$$\vec{V}_{TD} = D_{cd}^{TD} \left(\frac{\nabla \alpha_d}{\alpha_d} - \frac{\nabla \alpha_c}{\alpha_c} \right) \quad (8)$$

$$\vec{M}_{WL} = -C_{WL}(y_w) \alpha_d \rho_c \frac{|\vec{V}_{rll}|^2}{D_b} \vec{n} \quad (9)$$

$$\vec{V}_{rll} = \vec{V}_r - (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) \vec{n} \quad (10)$$

$$C_{WL}(y_w) = \max \left\{ C_{w1} + \left(\frac{C_{w2}}{y_w} \right) d, 0 \right\} \quad (11)$$

$$\vec{M}_{VM} = C_{VM} \rho_c \rho_c \left[\left(\frac{Dv}{Dt} \right)_c - \left(\frac{Dv}{Dt} \right)_d \right] \quad (12)$$

앞서 서술한 지배방정식의 대류항과 확산항에 대해서는 2차 정도의 풍상차분기법(upwind scheme)과 중앙차분기법(central difference scheme)을 적용하였다. 또한, 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력연성은 Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation(SIMPLE) 알고리즘을 난류모형으로는 k- ω Shear Stress Transport(k- ω SST) 모델을 사용하였다.

3. 시뮬레이션 사례

3.1. 대상 선박 및 공기 분사부 배치

대상 선박(Fig. 1)은 170K급 액화천연가스운반선으로 삼성중

공업에서 건조하여 2010년 인도되었으며, 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 실제 운항 중이던 대상 선박에 삼성중공업에서 개발한 공기유탄시스템인 SAVER Air를 2015년 12월 싱가포르 Sembawang 조선소 입거 기간 중 설치하였다. 공기유탄시스템에 적용된 주요 장비의 배치는 Fig. 2에 나타내었다. 2개의 공기 압축기(air compressor)가 보선 스토어(bosun store) 및 엔진룸에 설치되어 있다. 보선 스토어 및 엔진룸에 설치된 공기 압축기는 선수부 및 선미부 스키킵(skeg) 앞부분에 설치된 공기 분사 장치들(air injectors)에 공기를 공급하는 역할을 한다. 또한, 각 압축기에 냉각수를 제공하기 위한 부스터 펌프(booster pump)가 보선 스토어에 설치되어 있다.

공기 분사 장치는 Fig. 2의 중앙 하단 사진과 같은 형태로 방오/침식방지 페인트가 적용되어 있다. 그리고 기 건조된 선박에 공기유탄시스템을 적용함에 있어 공간상의 제약과 개조 공사의 기술적 위험 등을 고려하여 공기 분사구는 선박 중심선 근처의 파이프 덕트 내부에만 설치되었다. 공기 분사구의 형상 및 위치는 Fig. 3에 자세히 나타내었다. 분사구는 원형 홀 형태로 직경은 100mm를 적용하였으며, 3개의 분사구가 1개의 그룹으로 총 6개의 그룹이 폭 방향으로 1000mm 간격으로 설치되어 있다.

Table 1 Main particulars of twin-screws LNGC

Length overall (m)	Breadth (m)	Draught (m)
290.0	45.0	11.5



Fig. 1 Target ship: Twin-screws LNGC

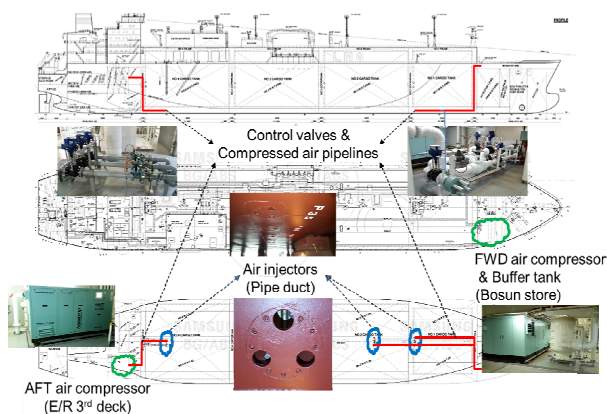


Fig. 2 Arrangement of air lubrication system

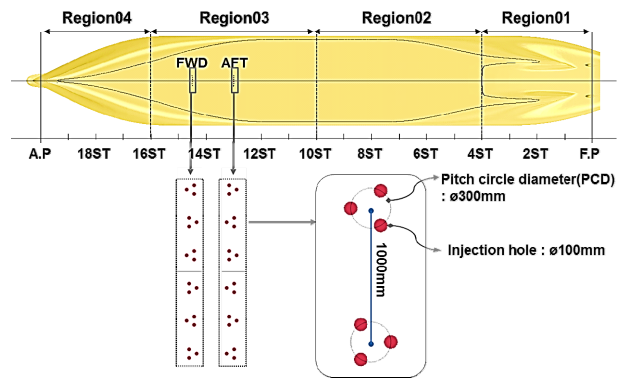


Fig. 3 Configuration of injection-opening holes on the bottom of a hull surface

3.2 격자계 구성 및 경계 조건

공기 주입에 의한 마찰저항 감소율을 평가하는데 있어 조파 저항은 거의 영향을 주지 않으므로 자유수면 효과는 배제하고 이중모형(double body model)을 사용하여 해석을 수행하였다. 경계 조건을 포함한 해석 대상에 대한 공간 영역은 Fig. 4에 보였으며, 입구면(inlet)은 선수로부터 1.5LBP, 출구면(outlet)은 선미로부터 1.5LBP, 바닥면(bottom)은 수면으로부터 1.5LBP, 측면(side)은 선체 대칭면으로부터 1.5LBP 떨어지도록 구성하였다.

공간 영역 및 선체 표면에서의 격자 모양과 분포를 Fig. 5에 보였다. 총 격자수는 약 1천만 개 수준이며, 고 레이놀즈수 유동($Re_{ex} = 2 \times 10^9$)의 효율적인 계산을 위해 벽 함수 사용과 함께 로그법칙을 만족하는 범위 내에서 약 1000 수준의 y^+ 를 적용하였다. 또한, 바닥면의 마찰저항 감소율을 정도 높게 예측하기 위해 격자를 상대적으로 더 세밀하게 생성하였다. 유동계산은 비정상상태 조건에서 수행하였고, Fig. 4에 나타낸 계산영역에 적용한 경계 조건은 다음과 같다. 입구면, 측면 및 바닥면에는 입구속도(velocity inlet), 출구면에는 출구압력(pressure outlet), 상부면에는 대칭유동(symmetry) 조건을 부여하였다. 그리고 분사구에는 공기 주입 유/무에 따라 입구속도 또는 점착 조건(no-slip)으로 구분하여 적용하였다.

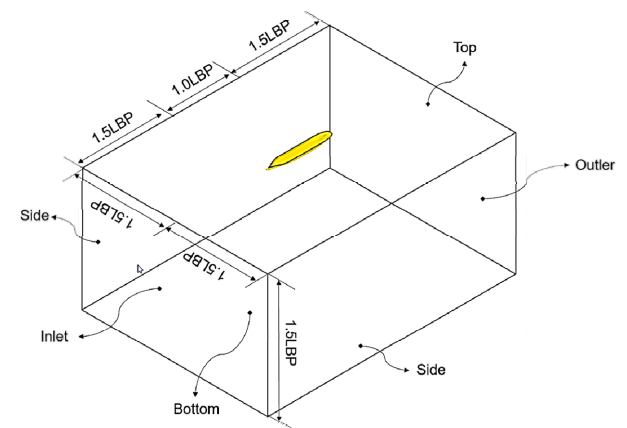


Fig. 4 Schematic drawing of the model and flow domain for simulation of frictional drag reduction

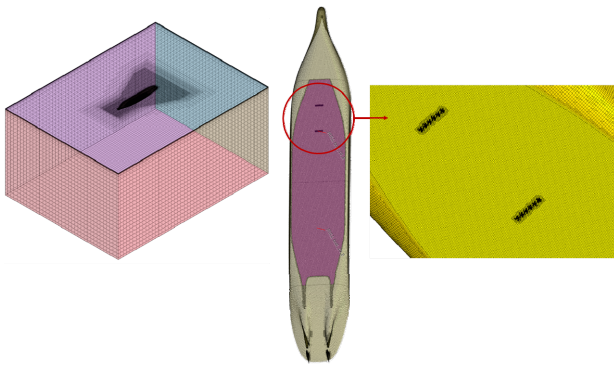


Fig. 5 Mesh distribution for simulation of frictional drag reduction

4. 시운전 결과와의 비교를 통한 시물레이션의 유용성 검토

시물레이션의 유용성 확인을 위해 시운전이 수행된 조건들 중 일부에 대해 수치해석을 수행하고, 그 결과를 시운전 결과와 비교하였다. 주요 해석 조건은 Table 2에 보였으며, 공기 주입량은 대기압 기준으로 나타내었다. 이 때, case1은 2열로 배치된 공기 분사장치 중 전방 열만 활성화된, case2와 case3은 후방 열만 활성화된, 그리고 case4는 전후방 공기 분사 장치가 모두 활성화된 조건이다.

Table 2 Simulation conditions to predict frictional drag reduction

Case	Ship speed (V _s , knots)	Air injection rate based on ambient pressure (Q _a , m ³ /h)	
		FWD	AFT
1	19.16	2531	-
2	17.98	-	5080
3	17.91	-	3665
4	16.00	1649	4983

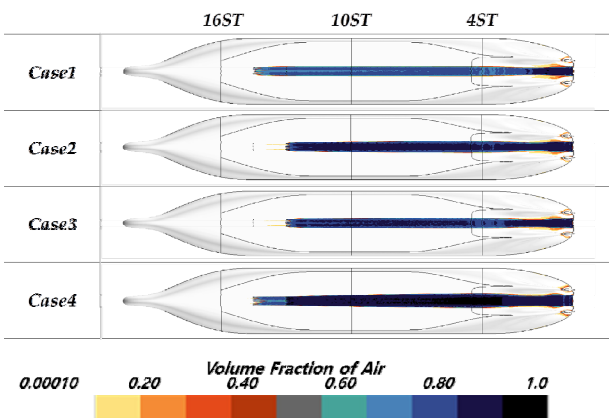


Fig. 6 Distribution of volume fraction of air on the hull surface

Table 3 Covered area and mean value of volume fraction of air

	Case1	Case2	Case3	Case4
Covered area (m ²)	1312 (8.0%)	1370 (8.4%)	1266 (7.7%)	1739 (10.6%)
Mean value (-)	0.728	0.808	0.783	0.840

* (): area ratio = air layer area / wetted surface area

선박 속도와 공기 주입량 변화에 따른 선저 바닥면에서의 공기체적분율 분포를 Fig. 6에 보였다. 분사구를 통해서 주입된 공기는 측면으로 갈라지지 않고 선미부 끝단까지 공기층을 유지하면서 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한, 스케그 사이의 가속 구간을 지나면서 공기층 두께가 일시적으로 감소하나, 선미 끝단으로 이동하면서 정체되어 공기층이 다시 두꺼워지는 경향도 함께 관찰된다. 수치해석을 통해 구한 공기층 면적과 공기층 평균 두께에 대한 정량적 값은 Table 3에 나타내었다. 여기서, "covered area"는 공기층 면적, "mean value"는 공기층 영역에서의 공기체적분율 평균값(α_{mean})을 의미한다.

Fig. 6에 도시한 선저 바닥면에서의 공기체적분율 분포 차이로 인해, Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 전단응력 변화량($\Delta shear$)에서 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 여기서, 전단응력 변화량 공식 (13)과 같이 정의하였다. 공기 주입량이 많은 조건일수록 전단응력 변화량이 선미부 끝단 영역에 이르기까지 상대적으로 많은 것을 볼 수 있다. 이는 결과적으로 마찰저항 감소를 증가로 이어진다. 그리고 공기 주입 유/무에 따른 압력 변화량($\Delta pressure$)을 Fig. 7(b)에 나타내었으며 식 (14)와 같이 정의하였다.

$$\Delta shear = \frac{shear_{w/air} - shear_{w/oair}}{\frac{1}{2} \rho V_{ship}^2} \tag{13}$$

$$\Delta pressure = \frac{pressure_{w/air} - pressure_{w/oair}}{\frac{1}{2} \rho V_{ship}^2} \tag{14}$$

압력 변화량과 관련하여 주목할 만한 점은, 선미 끝단부에서의 압력 회복 특성으로 공기 주입량이 증가할수록 회복량이 점차 증가한다는 것이다. 이는 Fig. 7(b)의 공기체적분율 분포와 같이 선미 스케그 사이의 유동 가속 구간을 지나온 공기층이 선미 끝단부에 정체되는 현상에 따른 것으로 판단된다.

주입된 공기가 추진기에 미치는 영향을 살펴보고자 공기 주입량이 가장 많은 case4 조건에 대해 추진기면에서의 축 방향 속도 분포를 공기 미 분사 상태와 함께 Fig. 8에 비교하여 보였다. 이때, 추진기면과 선체 표면에서의 공기체적분율 분포도 함께 나타내었다. 추진기면에서의 축 방향 속도 평균값과 공기체적분율 분포를 통해 분사구로부터 주입된 공기가 추진기면으로 유입되지 않음을 확인하였다. 이 결과로부터, 해석 조건 중 대기압 기준으로 최대 공기주입 조건인 6632m³/h 이하에서는 공기층 거동에 의한 추진 효율 저하는 없을 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 공기 주입량이 증가할 시에는 이에 대한 추가 검토가 필요하다.

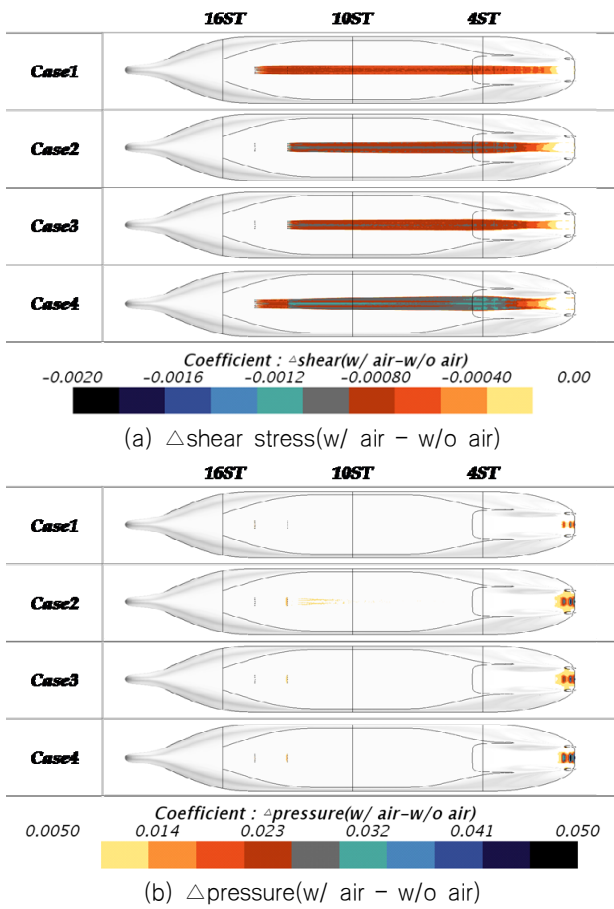


Fig. 7 Distributions of wall shear stress and pressure differences between w/o and w/ air injection

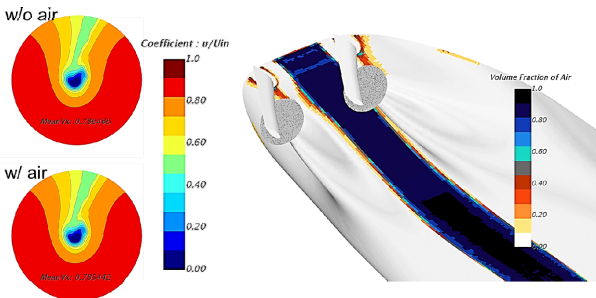


Fig. 8 Distribution of mean velocity at the propeller plane including volume fraction of air on the hull surface

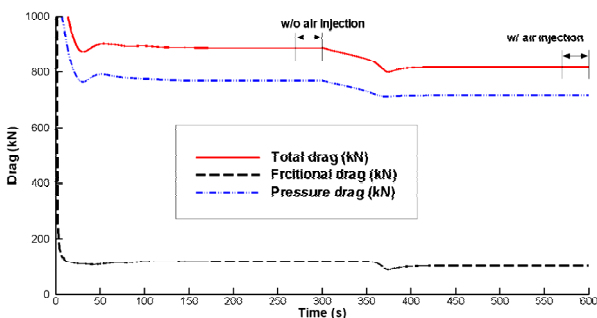


Fig. 9 Convergence history of drag components for case4 condition

지금까지, 공기 분사 유/무에 따른 선체 표면 및 추진기 주변에서의 유동 특성을 살펴보았다. 지금부터는 물리량 특성에 대해 살펴보고자 한다. 계산 시간에 따른 전체저항의 수렴 특성을 case4 조건을 예로 들어 Fig. 9에 보이고 있다. 300초까지는 공기 미 분사 상태에서의 저항값, 이후 600초까지는 공기 분사 상태에서의 저항값을 나타낸다. 본 연구에서는 공기 분사 유/무시의 저항값은 각각 270~300초 및 570~600초 구간에 대한 평균값을 취하였으며 이로부터 감소율을 평가하였다.

Table 2에 나타난 각각의 조건에 대해 공기 분사 유/무에 따른 저항값을 비교하였다. 이 때, 수치해석 결과는 이중 모형에 대한 것으로 조파저항 및 공기저항 성분은 포함되어 있지 않다. 이에 따라, 공기 미 분사 상태에서 자유수면 효과를 고려한 추가 해석을 통해 조파저항 성분을 별도로 구하고, 공기저항은 식 (15)를 사용하여 구하였다. 여기서, ρ_{air} 는 공기 밀도, V_{air} 는 바람 속도, A_T 는 정면 투영 면적을 의미한다. 또한, C_{x0} 는 바람 하중 계수로 0.837을 적용하였다.

$$R_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_{air}^2 A_T C_{x0} \quad (15)$$

이를 해석 결과에 반영하여 공기 분사 유/무시의 소요 마력을 식 (16) 및 (17)을 통해 구하였다. 그리고 최종 마력감소율을 식 (18)로부터 계산하고 그 결과를 시운전 결과와 비교하여 Fig. 10에 보였다.

$$[A]BHP_{w/oair} = \frac{(EHP_{vis_{w/o}} + EHP_{wave} + EHP_{wind})}{Prop_{effi.}} \quad (16)$$

$$[B]BHP_{w/air} = \frac{(EHP_{vis_{w/}} + EHP_{wave} + EHP_{wind})}{Prop_{effi.}} \quad (17)$$

$$BHP\ reduction\ ratio(\%) = \left(1 - \frac{[B]}{[A]}\right) \times 100 \quad (18)$$

Fig. 10에 보인 바와 같이 EMP 모델을 사용하여 추정된 소요마력감소율은 case1의 경우에는 다소 차이(약 1.4%)를 보이나, case2~case4의 경우들에서는 최대 0.6% 이내로 시운전 결과와 대체로 잘 일치하는 경향을 보인다. 또한, 각 조건들 간의 우열 비교에 있어서는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 상기 결과로부터 EMP 모델을 사용하여 실제 선박에서의 마력 감소 예측이 가능할 수 있음을 확인하였다.

각 해석 조건에서의 소요마력감소율을 저항 성분별로 구분하여 Fig. 11에 보였다. 공기 분사구를 통해서 주입된 공기로 인해 마찰저항 성분뿐만 아니라 압력저항 성분까지 감소되는 현상이 주목할 만하며, 공기 주입량이 증가할수록 각 성분의 감소비도 점차 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

추가로, 마찰저항 및 압력저항 성분의 변화에 의한 소요마력 감소율을 각각 Fig. 12 및 Fig. 13에 영역별로 보였다. 이 때, 각 영역은 식 (19)와 같이 스테이션을 기준으로 나누어 정의하였으며, Fig. 3을 통해 각 영역들과 기준 스테이션(LBP/20)들을

확인할 수 있다. 여기서, ST는 길이 방향 간격을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 &16.0ST < Region01 \\
 &10.0ST < Region02 \leq 16.0ST \\
 &4.0ST < Region03 \leq 10.0ST \\
 &Region04 \leq 4.0ST
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

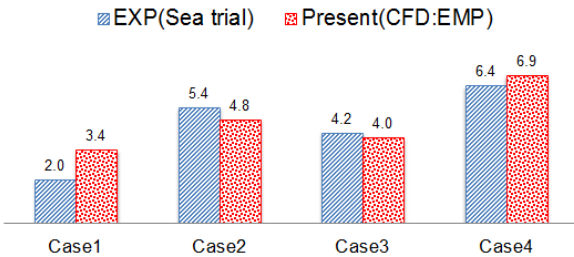


Fig. 10 BHP reduction ratio between sea trial and CFD simulation

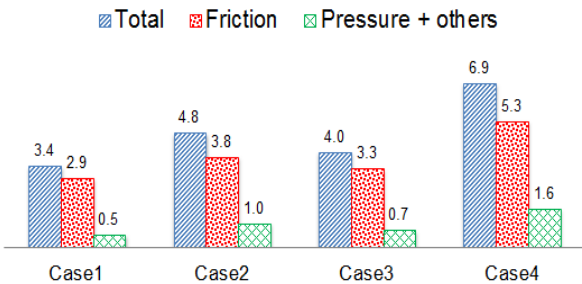


Fig. 11 BHP reduction ratio due to drag components

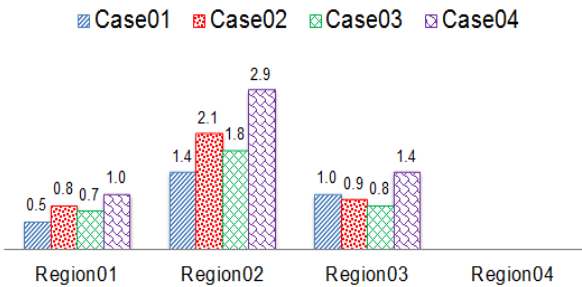


Fig. 12 BHP reduction ratio contributed by frictional drag reduction in each region

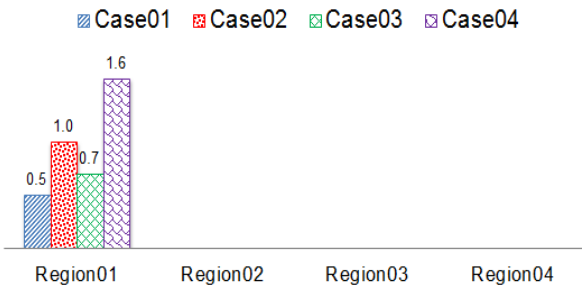


Fig. 13 BHP reduction ratio contributed by pressure drag reduction in each region

Fig. 12는 마찰저항 감소로 인한 각 영역별 소요마력감소율을

보여준다. 공기 분사구가 13.0ST와 14.5ST에 위치하므로 Region01에서는 마력감소가 나타나지 않으며, Region02에서부터 처음으로 감소가 시작되어 Region03에서 감소율이 극대화된다. 이후, Region04로 이동하면서 추가 감소가 발생하나 감소율은 상대적으로 줄어드는 경향을 보인다. Region02에서 Region03에 비해 마력감소율이 작은 이유는, 공기 분사가 시작되는 13.0ST 또는 14.5ST 전방 영역 및 주입된 공기가 균일 이동과 거의 동일한 방향으로 이동하기까지 덮지 못한 영역의 발생으로 공기층 면적이 상대적으로 좁기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Region04의 감소율이 Region02 보다 조금 더 작은 이유는, 수평 투영 면적이 더 작고 공기층을 선미 끝단까지 유지할 수 있을 만큼 공기량이 충분하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 하지만, 주목해야 할 점은 공기 분사구를 통해서 주입된 공기가 선미 끝단까지도 유지될 수 있음이 시뮬레이션 결과로부터 제시된 것이다.

압력저항 변화에 의한 소요마력감소율을 영역별로 나타낸 Fig. 13을 살펴보면, Region01에서는 압력 변화가 없으므로 마력감소가 없고 Region02, 03 같이 바닥면이 평평한 영역에서는 압력저항 성분이 영이므로 당연히 감소가 있을 수 없다. 이후, 압력구배가 발생하는 Region04의 선미단부에서 감소 효과가 나타나며 공기 주입량이 증가할수록 마력감소율도 증가하는 경향을 보인다.

5. 저항저감 성능 향상을 위한 공기 분사부 배치 변화 검토

본 장에서는 기존 운항 선박에 설치된 공기유향시스템의 재배치를 통해 마찰저항의 추가적인 감소 방안에 대하여 검토하였다. 기존 선박의 공기유향시스템을 살펴보면, 분사부의 폭은 전체 폭의 12%에 해당하며 공기 분사부는 13.0ST와 14.5ST에 설치되어 있다. 선저 바닥을 덮는 공기층 면적은 Table 3에 보인 바와 같이 전체 침수표면적의 8.0~10.6% 수준이다. 이는 공기 주입을 통해서 얻을 수 있는 마찰저항 최대 감소율이 10.6% 이내임을 의미한다. Table 2에 보인 시운전 조건의 공기주입량은 대기압 기준 2531~6062m³/h로, 수압에 의한 공기 압축을 고려하여 바닥면에서의 공기분사량으로 환산하면 약 1465~3508m³/h 수준이다. 이는 공칭 공기층 두께(t_a)로 8~24mm, 단위 폭 당 공기주입량(q)으로는 0.08~0.20m²/s 수준에 해당한다. 이에 대해, Kim et al. (2020)의 5장 “Large Cavitation Channel(LCC) 조건에서의 Air Layer Drag Reduction(ALDR) 시뮬레이션 및 실선 크기로의 확장 연구” 결과를 바탕으로 유추해보면 16~20knots 선속에서 ALDR 특성을 유지하기 위한 최소한의 q는 0.03~0.04m²/s이며, t_a는 4~5mm 수준으로서 현재 설계된 공기유향시스템이 과도한 양의 공기를 주입하고 있다는 것을 유추할 수 있다. 따라서, 마찰저항을 추가적으로 감소시키기 위해서는 공기층 면적을 최대한 확보함과 동시에 ALDR 범위 내에서 공기층 두께가 최소화되도록 설계하는 것이 필요하다. 이를 구현하는 가장 용이한 방법은 폭 방향으로 분사구 수를 증

가시켜 공기층 면적을 확보하는 동시에 공기층 두께를 적정 한 도까지 줄이는 것이다.

상기 분석 결과를 바탕으로, 분사구의 폭 방향 배치 변화가 저항특성 변화에 미치는 영향을 $V_{ship}=16knots$ 조건에 국한하여 살펴보았다. 분사구 배치에 대한 개략도는 Fig. 14에 보였다. 이 때, 공기 주입량은 모두 동일하게 고정하였으며 상세 조건은 Table 4에 나타내었다.

공기 주입량이 가장 많은 $Q=15000m^3/h$ 조건에 대해 폭 방향 변화에 따른 경향을 살펴보았다. 바닥면에서의 공기층 면적, 공기체적분율 분포 및 이에 대한 평균값을 Fig. 15 및 Table 5에 나타내었다. 폭 방향으로 분사구를 늘려갈수록 공기층 면적이 증가하고 두께는 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 동시에 선미 스케그 바깥 영역으로 공기층이 확산되는 현상이 함께 관찰된다. 이에 대해 좀 더 자세히 살펴보면, 전체 침수표면적 중 공기층이 차지하는 면적은 기존 15.5%에서 최대 36.6%까지 증가하는 반면, 공기체적분율 평균값은 0.877에서 0.766으로 13% 정도 감소한다. 마찰저항 감소율은 공기층 면적과 공기체적분율 평균값에 의해 결정된다고 보면, 폭 방향으로 분사구를 증가시킨 상태에서 동등 수준의 공기를 주입하는 것이 상대적으로 유리한 것으로 판단할 수 있다.

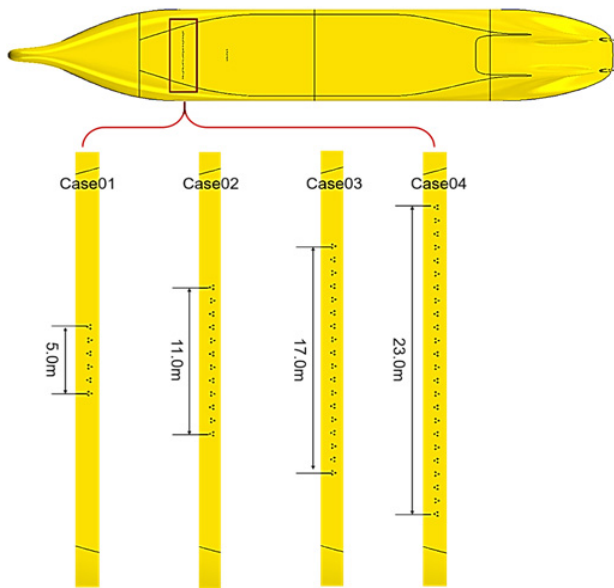


Fig. 14 Schematic drawing of the air injection-opening holes

Table 4 Simulation conditions to investigate the drag reduction ratio due to change in maximum breadth of air injection-opening holes

Ship speed (V_{ship} , knots)	Air injection rate based on ambient pressure (Q_i , m^3/h)	Maximum breadth of air injection-opening holes (B_A , m)
16	2500, 5000 7500, 10000 12500, 15000	5, 11, 17, 23

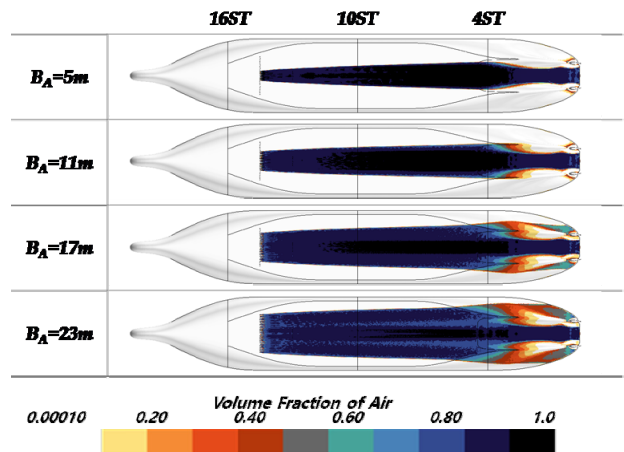


Fig. 15 Distribution of volume fraction of air due to change in B_A with $V_{ship}=16knots$ and $Q_i=15000m^3/h$

Table 5 Covered area and mean value of volume fraction of air due to change in B_A with $V_{ship}=16knots$ and $Q_i=15000m^3/h$

B_A (m)	5	11	17	23
Covered area (m^2)	2544 (15.5%)	3370 (20.6%)	4775 (29.2%)	5983 (36.6%)
Mean value (-)	0.877	0.852	0.805	0.766

* (): area ratio = air layer area / wetted surface area

추가적으로, 공기 분사구 배치 차이에 의한 전단응력 및 압력 변화량 차이를 Fig. 16에 보였다. 전단응력 변화량 측면에서 공기 분사구 배치 폭이 증가할수록 공기층 두께가 상대적으로 감소하여 동일 위치에서의 전단응력 변화량은 줄어드나, 공기층 면적이 확대됨에 따라 더 넓은 영역에 걸쳐 전단응력 변화가 발생한다. 또한, 기존 $B_A=5m$ 조건에서는 공기층이 스케그 안쪽에만 이동하여 전단응력 감소 영역이 제한적이었지만, 분사구 배치 폭이 증가함에 따라 바닥면을 따라 이동하던 공기층이 스케그 안쪽뿐만 아니라 바깥쪽으로도 확산하여 전단응력 변화가 스케그 외부 영역에서도 발생함을 알 수 있다. 더불어, 공기 분사를 폭 방향으로 넓게 배치하면 선미 끝단부에서 추가적인 압력 회복이 관찰되는 점도 흥미롭다.

폭 방향 배치에 따른 마찰저항, 압력저항 및 전체저항 감소율 특성을 Fig. 17에 보였다. 이 때, x축은 대기압 기준 공기주입량, y축은 저항 감소율로 공기 분사 유/무에 따른 저항성분별 차이와 공기 미 분사 상태의 전체저항 간의 비를 의미한다. Fig. 17(a)에 보인 바와 같이 분사구를 넓게 배치할수록 선미 끝단부에서의 압력 회복으로 압력저항 감소율이 증가하나, $B_A=5m$ 조건과 비교하여 최대 1.2% 이내 수준으로 마찰저항 감소율에 비해서는 크지 않다. 마찰저항 감소율은 분사구 배치 변화에 따라 큰 차이를 보인다. 분사구가 폭 방향으로 5m 이내에 배치된 경우, 공기 주입량 변화에 따라 마찰저항은 3.6~8.2%로 감소한다. 폭 방향으로 공기 분사구가 넓게 배치될수록 마찰 저항 감

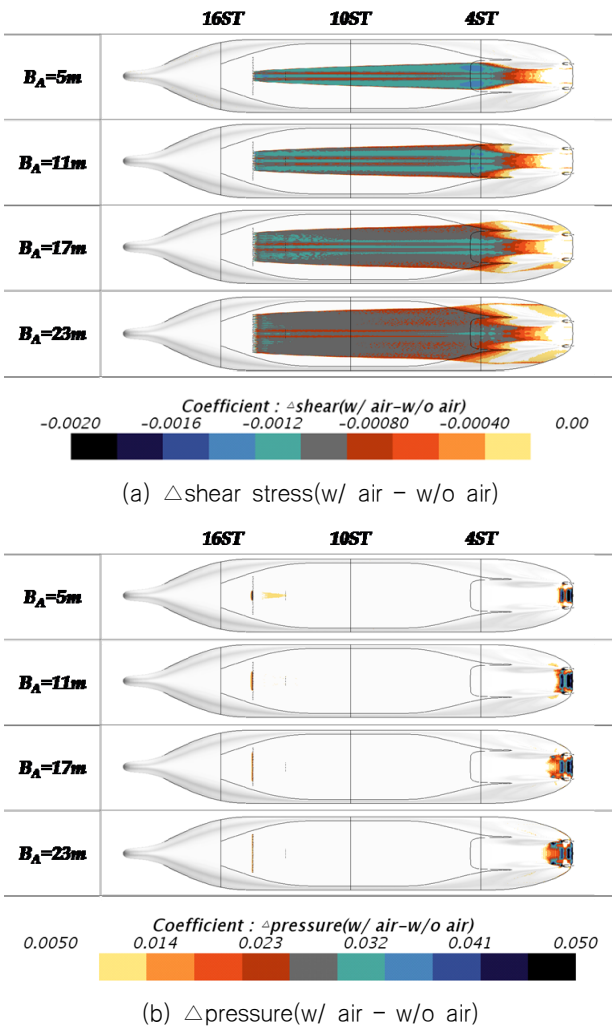
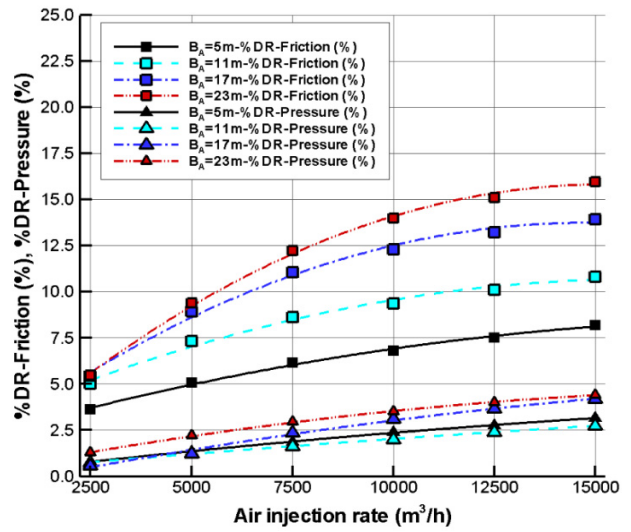


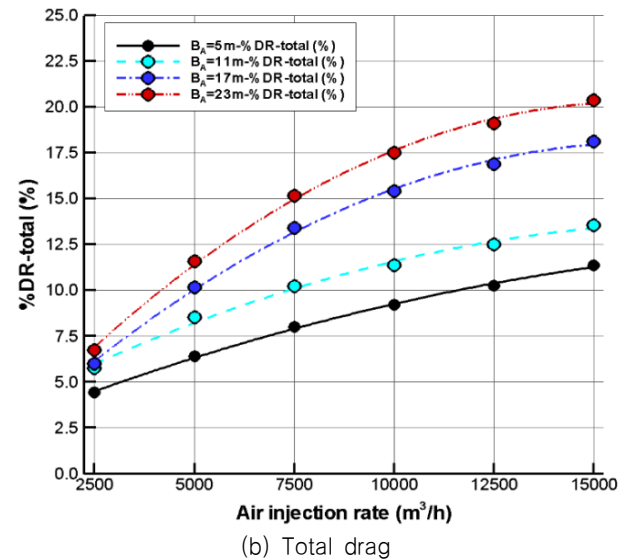
Fig. 16 Distributions of shear stress and pressure differences due to change in B_A with $V_{ship}=16$ knots and $Q_i=15000$ m³/h

소용이 점점 증가하여 배치 폭이 가장 넓은 $B_A=23$ m 조건에서는 마찰저항 감소율이 5.5~16.0%에 이른다. 이는 기존 설계안 결과와 비교하여 1.9~7.8%로 추가 개선되는 것으로, 마찰저항 감소에 있어 분사구 배치가 매우 중요함을 의미한다. 이를 종합하여 전체저항 감소율을 Fig. 17(b)에 보였다. 분사구 배치 폭을 23m로 설계한 경우, 공기 주입량 변화에 따라 기존 설계안 대비 최소 2.3%에서 최대 9.0%의 추가적인 저항감소가 기대된다.

한편, 배치 폭이 증가하게 되면 주입된 공기에 의해 더 넓은 영역에 걸쳐 유동장이 변하게 된다. 선박을 설계하는데 있어 저항 저감과 더불어 중요한 요소인 추진기 효율은 유동장의 영향을 받으므로 주입된 공기가 추진기 주위 유동에 미치는 영향에 대해 살펴볼 필요가 있다. B_A 가 5m와 23m인 경우에 대해 선체 표면의 공기체적분을 분포와 함께 축 방향 속도 발달 과정을 Fig. 18에 보였다. Fig. 18(a)는 공기 미 분사 상태의 결과로 중앙평행부를 따라 발달한 경계층은 스케그를 지나면서 급격히 두꺼워지는 경향을 보인다. 이는 결과적으로, 추진기 전/후방에서의



(a) Friction and pressure drag

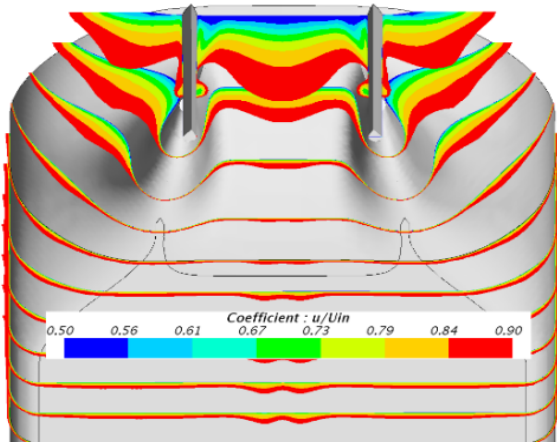


(b) Total drag

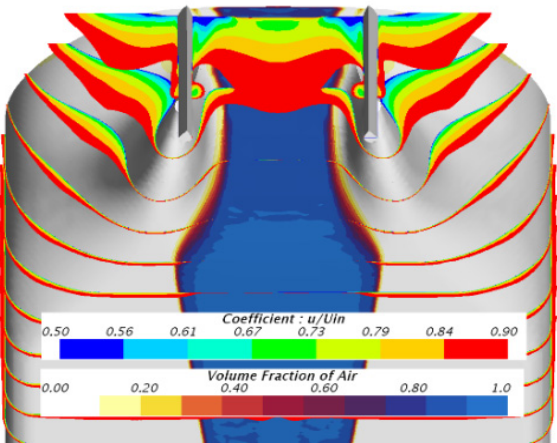
Fig. 17 Drag reduction ratios due to change in B_A with $V_{ship}=16$ knots

유동장 변화를 가져온다. B_A 가 5m인 경우의 결과인 Fig. 18(b)를 살펴보면 분사구 배치 폭의 제한으로 공기층이 유동 흐름을 따라 스케그 안쪽에서만 이동한다. 이로 인해, 공기층이 존재하는 영역에서는 축 방향 속도가 점차 가속되나 스케그 바깥쪽을 포함한 이 외의 영역에서는 공기 미 분사 상태와 차이를 보이지 않는다.

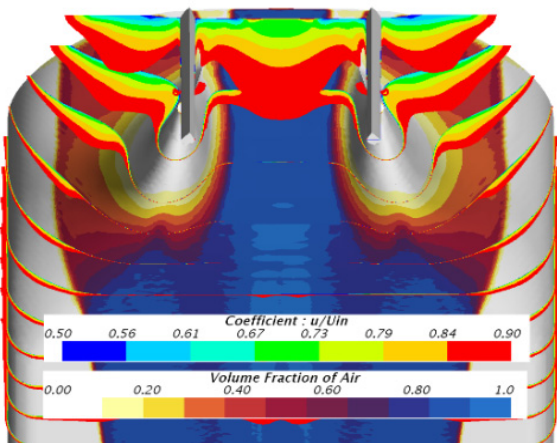
이에 반해, Fig. 18(c)에 보인 바와 같이 B_A 가 23m인 경우는 공기층이 스케그 안쪽뿐만 아니라 바깥쪽에도 형성되어 경계층 두께가 넓은 범위에 걸쳐 변하게 된다. 이러한 사실로부터, 추진기 주위 유동장이 변화할 것이라는 것은 쉽게 미루어 짐작할 수 있다. 이에 대해 좀 더 상세히 살펴보고자, 좌현 추진기면에서의 축 방향 속도 분포를 $Q_i=15000$ m³/h 조건에 국한하여 Fig. 19에 나타내었다. B_A 가 5m와 11m인 경우에는 분사부 폭 제한으로 인해 축 방향 속도 분포가 공기 미 분사 상태와 큰 차이가 없으나 B_A 가 17m와 23m인 경우에는 차이를 보임



(a) w/o air



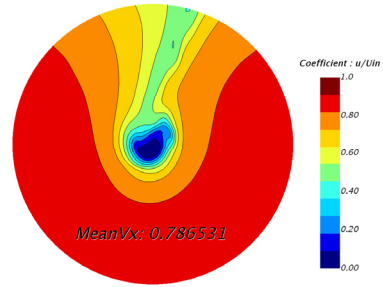
(b) $B_A=5m$



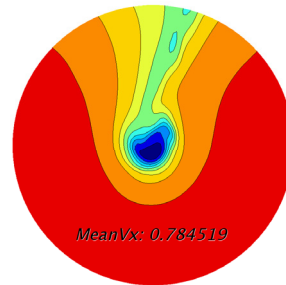
(c) $B_A=23m$

Fig. 18 Distributions of volume fraction of air on the hull surface and axial velocity around hull due to change in B_A with $V_{ship}=16knots$ and $Q_i=15000m^3/h$

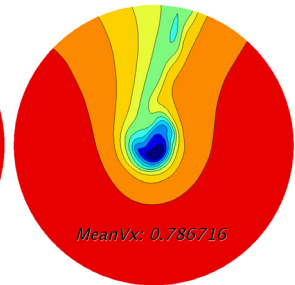
확인할 수 있다. 추진기 상부 영역($-30^\circ \sim 30^\circ$)에서 가속되는 현상이 나타나며 이는 앞서 Fig. 18에서 기술한 물리적 특성으로 설명된다. 또한, 추진기면으로 유입되는 축 방향 속도 분포는 상대적으로 균일해지는 경향을 보인다.



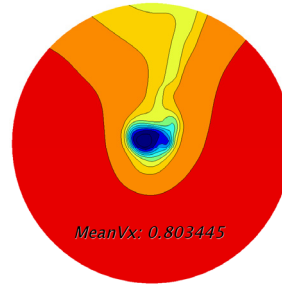
(a) w/o air



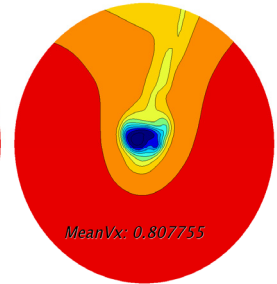
(b) $B_A=5m$



(c) $B_A=11m$



(d) $B_A=17m$



(e) $B_A=23m$

Fig. 19 Distributions of axial velocity at the propeller plane with $V_{ship}=16knots$ and $Q_i=15000m^3/h$

위 결과들로부터, 다음과 같은 사항들을 유추해 볼 수 있다. 추진기 면으로 유입되는 축 방향 속도 증가는 선체추진효율($\eta_H = (1-t)/(1-w_{TS})$)의 저하를 야기할 것이며, 추진기 부하의 감소에 따라 단독 효율(η_0)이 향상될 것이다. 또한, 추진기에 의해 야기되는 변동 압력은 유동장의 가속 및 균일화로 감소하게 될 것이다. 하지만, 이와 관련한 정량적 평가를 위해서는 별도의 연구를 통해서 확인이 필요하다.

6. 선체 표면 거칠기가 공기유향 저항저감에 미치는 영향 검토

해상에서 운용되는 대부분의 선박은 Fig. 20에 예로 보인 바와 같이 해양생물 등의 부착으로 인해 선체 표면 거칠기가 증가하게 되며 이는 결과적으로 저항 증가를 초래하게 된다.

본 장에서는 선체의 표면 거칠기가 공기유향에 의한 저항감소에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 참고로, 표면의 오염 정도에 대한

대표적인 지표를 Table 6 및 Fig. 21에 정리하여 나타내었다. Naval Ship's Technical Manual (NSTM, 2002) 등급(rating)은 미 해군에서 사용되는 오손 지표이며, K_S 및 Rt_{50} 은 Schultz (2004)에 의해 제안된 등가의 모래 거칠기 높이 및 도장 거칠기 높이이다.



Fig. 20 Ship hull showing extensive fouling by barnacles (<https://www.european-coatings.com/Homepage-news/Nanotechnology-and-anti-fouling>)

Table 6 Representative coating and fouling conditions

Description	NSTM rating (-)	K_S (μm)	Rt_{50} (μm)
Hydraulically smooth surface	0	0	0
Typical as applied AF coating	0	30	150
Deteriorated coating or light slime	10~20	100	300
Heavy slime	30	300	600
Small calcareous fouling or weed	40~60	1000	1000
Medium calcareous fouling	70~80	3000	3000
Heavy calcareous fouling	90~100	10000	15000

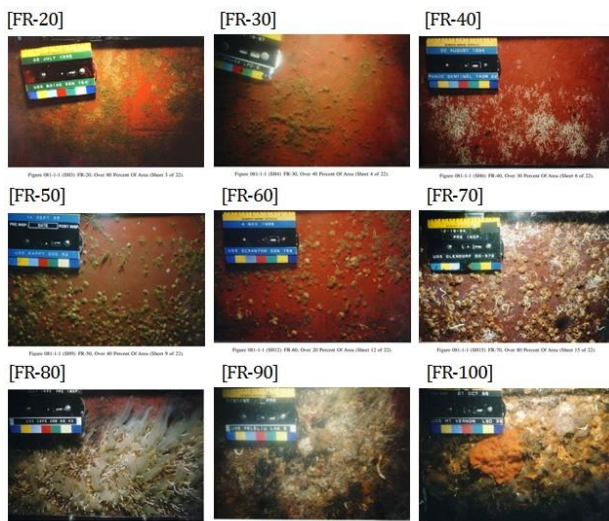


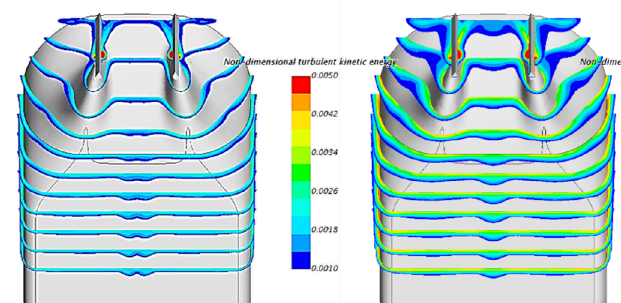
Fig. 21 Paint deterioration rating(PDR) scale, NSTM

표면 거칠기의 변화가 마찰저항 감소 효과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 선속은 16.0knots로 고정한 상태에서 공기주입량과 표면 거칠기를 변화시켜 가면서 Table 7에 나타난 조건에 대해 해석을 수행하였다. 조파저항과 공기저항 성분은 이전과 마찬가지로 별도로 구하여 더해주는 방식을 채택하였다.

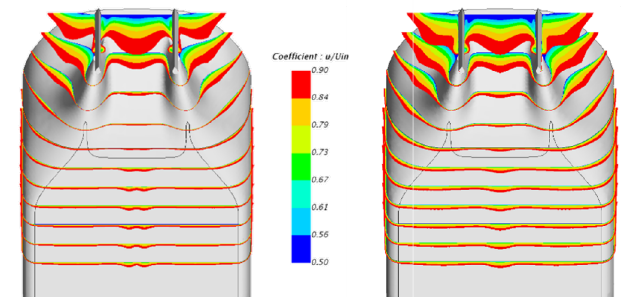
공기 미 분사 상태에서 표면 거칠기에 따른 선체 주위 및 표면에서의 유동 특성을 매끄러운 표면 조건(좌)과 450 μm 수준의 거칠기를 갖는 표면 조건(우)에 국한하여 Fig. 22 및 Fig. 23에 비교하여 나타내었다. Fig. 22에 보인 바와 같이, 선체 표면이 거칠어지면 경계층 내의 난류운동에너지가 증가하는 동시에 속도가 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과들은 실험을 통해 확인된 물리 현상과 부합하며, 특히 후자는 거친 관 내부 유동의 속도 분포에 대한 계측 데이터 (Nikuradse, 1933)로부터 확인할 수 있다 (Schlichting, 1979). 또한, Fig. 23에 나타난 것처럼 표면 거칠기가 증가하게 되면 선체 표면의 전단응력도 증가한다. 하지만 경계층이 매우 두꺼운 선미 끝에서는 거칠기 요소들이 두꺼워진 점성저층으로 덮이게 되므로 전단응력의 차이가 사라진다.

Table 7 Simulation conditions to find the correlation among the three parameters: ship speed V_{Ship} , air injection rate Q_i , and averaged coating roughness Rt_{50}

Ship speed (V_{Ship} , knots)	Air injection rate based on ambient pressure (Q_i , m^3/h)	Averaged coating roughness (Rt_{50} , μm)
16	2500, 5000, 7500, 10000, 12500, 15000	150, 300, 450, 600



(a) Turbulent kinetic energy



(b) Axial velocity

Fig. 22 Distributions of turbulent kinetic energy and axial velocity around stern hull region (left: smooth wall, right: 450 μm rough wall)

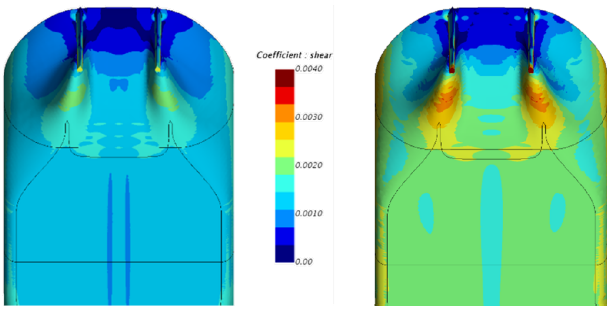


Fig. 23 Wall shear stress on the hull surface(left: w/ smooth wall, right: w/ 450µm rough wall)

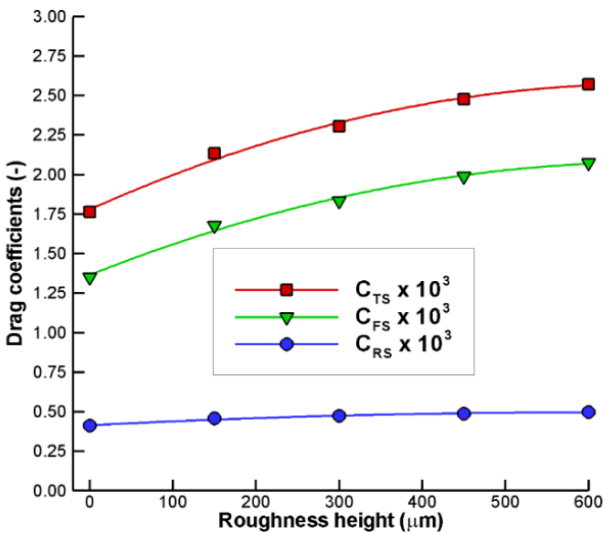


Fig. 24 Comparison of drag coefficients due to change in coating roughness(Rt_{50}) with $V_{ship}=16.00$ knots and w/o air injection

선체 표면 거칠기에 따른 저항 계수 변화를 Fig. 24에 나타내었다. 거칠기 증가에 따른 압력저항 계수 변화는 마찰저항 계수 변화에 비해 크지 않음을 확인할 수 있다. 이에 반해, 마찰저항 계수는 거칠기가 증가함에 따라 단조 증가하는 경향을 보인다.

각 성분별 저항 계수 값을 Table 8에 나타내었으며, ()는 각 저항성분 계수를 매끄러운 표면 조건의 전체저항 계수로 나누어 백분율로 표시한 것이다. 표면 거칠기가 증가할수록 전체저항 계수도 점차 증가하여 600µm 거칠기 조건에서 45.9%까지 증가함을 확인하였으며, 성분별로는 압력저항 계수가 4.9%, 마찰저항 계수가 41.0%를 차지한다. 이러한 결과는 선체 표면의 거칠기 변화가 마찰저항에 지대한 영향을 미치는 것을 의미하며, 과다한 연료 소모를 줄이기 위해서는 선체 표면에 대한 지속적인 관리가 필요함을 시사한다.

추가로, 선속을 16.0knots, 공기주입량을 15000m³/h로 고정된 상태에서 매끄러운 표면, 150µm 및 450µm 거칠기 표면 조건의 3가지 경우에 대해 공기체적분율, 압력 및 전단응력 변화량 차이를 Fig. 25에 나타내었다. 이 때, 압력 및 전단응력의 변화량은 각각의 표면 거칠기 조건에서 식 (13) 및 (14)에 정의한 공기 분사 유/무시의 차이를 의미한다.

Table 8 Drag coefficient values due to change in coating roughness(Rt_{50}) with $V_{ship}=16.00$ knots and w/o air injection

		Coefficients (-)		
		$C_{TS} \times 10^3$	$C_{RS} \times 10^3$	$C_{FS} \times 10^3$
Coating roughness (µm)	0	1.762 (100.0%)	0.411 (23.3%)	1.351 (76.7%)
	150	2.132 (121.0%)	0.456 (25.9%)	1.676 (95.1%)
	300	2.304 (130.8%)	0.472 (26.8%)	1.833 (104.0%)
	450	2.477 (140.6%)	0.487 (27.6%)	1.989 (112.9%)
	600	2.571 (145.9%)	0.497 (28.2%)	2.074 (117.7%)

Table 9 Covered area and mean value of volume fraction of air due to change in coating roughness(Rt_{50}) with $V_{ship}=16.00$ knots and $Q_i=15000$ m³/h

Coating roughness (µm)	0	150	450
Covered area (m ²)	5983 (36.6%)	6216 (38.0%)	6215 (38.0%)
Mean value (-)	0.766	0.713	0.674

* () : area ratio = air layer area / wetted surface area

표면 거칠기가 증가하더라도 공기층 면적은 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 하지만, 공기체적분율 값은 거칠기가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이에 대한 정량적 지표는 Table 9에 나타내었다. 공기층 면적 변화는 최대 1.4% 차이로 크지 않은 반면, 공기체적분율 평균값은 0.766에서 0.674로 최대 12%까지 감소한다. 앞서 기술한 바와 같이, 마찰저항 감소율은 공기체적분율 평균값과 공기층 면적으로 결정됨을 상기하면, 표면 거칠기가 증가할수록 각 조건에서의 공기 미 분사 상태를 기준으로 한 마찰저항 감소율이 줄어들 것은 쉽게 예상할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 25(b)에 도시한 전단응력 변화량 차이에서도 확인할 수 있다. 거칠기가 증가할수록, 분사구 근처로부터 선미 끝단부에 이르기까지 전단응력 변화량이 매끈한 표면 조건의 결과와 비교하여 상대적으로 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해, 압력 변화량 분포(Fig. 25(c))에서는 큰 차이가 나타나지 않는다.

공기 미 분사 상태인 매끄러운 표면의 전체 저항을 기준으로 공기주입량 및 표면 거칠기에 대한 저항감소 효과의 변화를 Fig. 26에 비교하여 보였다. Fig. 26(a)은 전체저항 감소율로, 공기 미 분사 상태에서 거칠기가 증가함에 따라 전체저항은 21.0~45.9%까지 증가한다. 한편, 각각의 거칠기 조건에서 공기주입량을 증가시키면 전체저항은 점차 감소함을 알 수 있다.

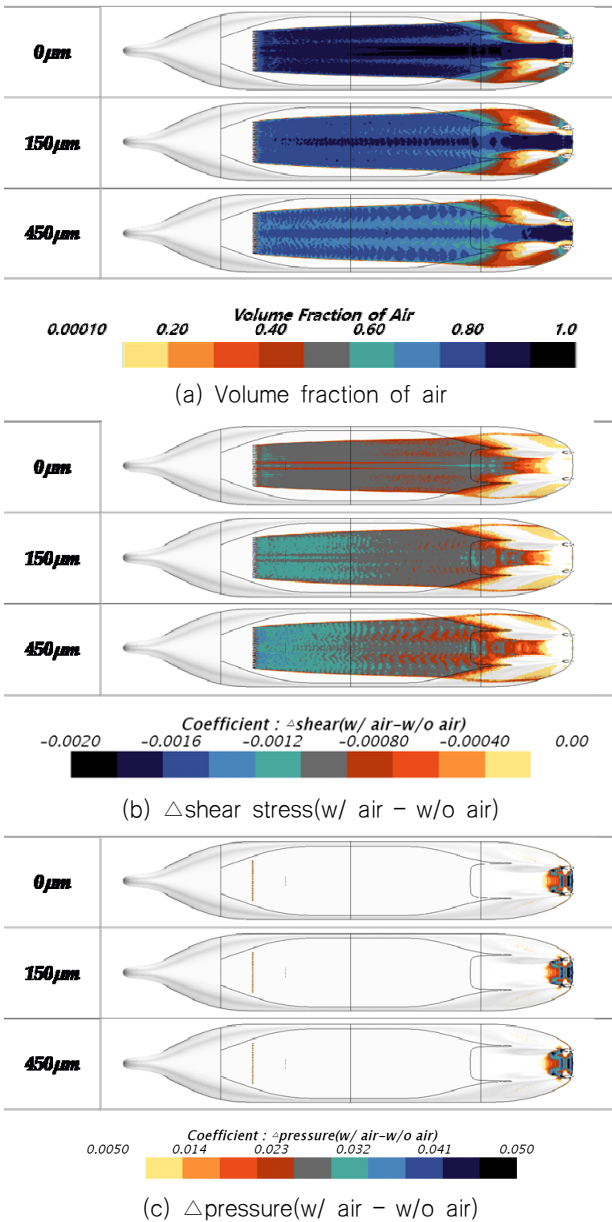
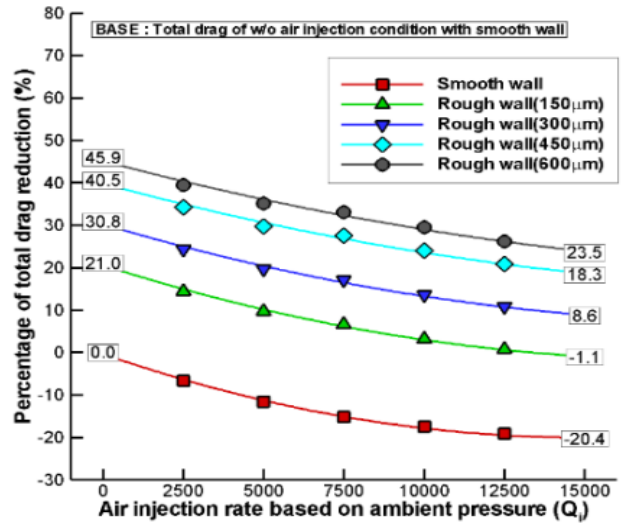


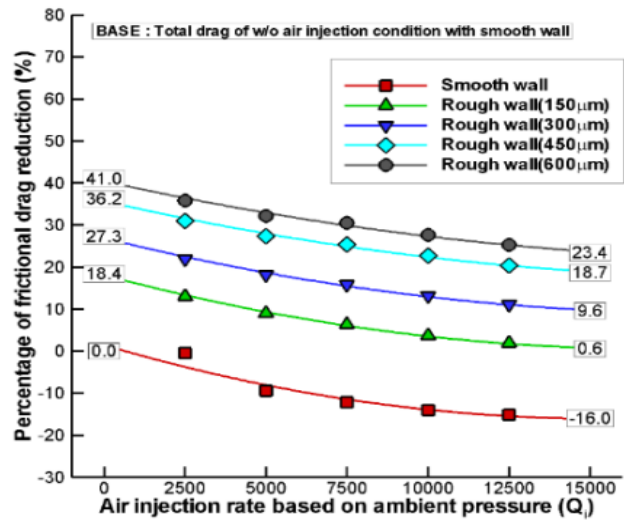
Fig. 25 Distributions of volume fraction of air, shear stress and pressure differences due to change in coating roughness(Rt_{50}) with $V_{ship}=16.00$ knots and $Q_i=15000$ m³/h

이 때, 각 거칠기 조건에서 최대 감소율은 거칠기에 관계없이 모두 유사함(smooth wall: 20.4%, 150 μ m: 22.1%, 300 μ m: 22.2%, 450 μ m: 22.2% 및 600 μ m: 22.4%)을 확인할 수 있다.

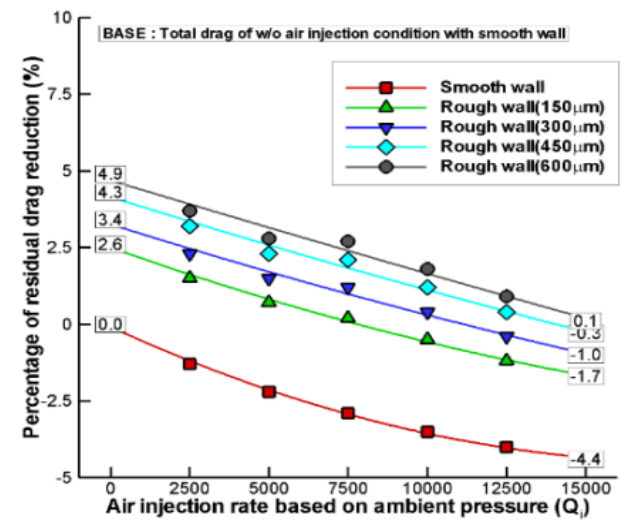
Fig. 26(b)와 (c)에 마찰저항 및 압력저항 감소율을 나타내었다. 공기주입량에 대한 마찰저항 감소율의 기울기는 표면 거칠기에 관계없이 유사하며, 감소율도 16.0~17.6%(최대 1.6% 차이)로 큰 차이를 보이지 않는다. 압력저항 감소율은 4.3~4.8%(최대 0.5% 차이)로 마찰저항 감소율과 비교하여 더욱 차이가 나지 않는다. 이를 통해, 본 연구에서 고려한 표면 거칠기 범위 안에서는 공기유향시스템 적용을 통한 저항 감소가 가능함을 확인하였다.



(a) Total drag



(b) Frictional drag



(c) Residual drag

Fig. 26 Comparisons of drag reduction ratio due to change in coating roughness(Rt_{50}) and air injection rate based on w/o air injection condition in smooth wall

7. 결론

삼성중공업이 건조하여 2010년 인도한 액화천연가스운반선을 대상으로, Kim et al. (2019)에 의해 우수성이 확인된 EMP 모델을 활용하여 소오마력 또는 마찰저항 감소율을 살펴보았다. 이와 함께, 공기유회시스템을 설계함에 있어 중요한 인자인 공기 분사구 배치에 대해 검토하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 시운전 조건에 대한 실선 유동 수치해석을 통해 공기 분사에 의한 소오마력감소율을 예측하고, 그 결과를 시운전 자료와 비교하였다. 그 결과, 예측된 마력감소율이 시운전 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 이를 통해, 실선 스케일 조건에서도 제안된 수치기법이 적용 가능함을 확인하였다.
- 기존 선박에 설치된 공기유회시스템 재배치를 통해 추가적인 마찰저항 감소 방안에 대해 검토하였다. 검토 결과, 마찰저항 감소를 극대화하기 위해서는 공기층 면적을 최대한 확장함과 동시에 공기유회가 안정적으로 유지되는 범위 내에서 공기층 두께를 최소화해야함을 확인하였다. 이를 구현하는 가장 용이한 방법은 폭 방향으로 분사구 개수를 증가시켜 공기층 두께를 적정 수준으로 조절함과 동시에 공기층이 덮는 면적을 최대한 확장하는 것이다.
- 표면 거칠기가 공기유회에 의한 저항 감소 효과에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 본 연구에서 고려한 거칠기 범위 내에서 공기주입량에 대한 저항감소량이 모두 유사함을 확인하였다. 따라서, 거친 표면 조건의 선박에 대해서도 공기유회시스템에 의한 속도 성능의 개선이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

향후에는 실제 해상 운항 조건이 공기 거동 특성 및 속도 성능 개선에 미치는 영향을 파악하기 위해서 파도 및 선박 운동 등을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

ABS, 2019. Air Lubrication Technology.

Antal, S. P., Lahey, R. T. & Flaherty, J. E., 1991. Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 17, pp.635-652.

Foreship, 2016. A smoother path to air lubrication – article in 'The Naval Architect', *The Royal Institution of Naval Architects*, pp.61-62.

Kim, H. T., 2020. *Study on drag reduction technique with air layer Injection to commercial ships based on computational fluid dynamics simulation*. Ph.D. thesis, Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea.

Kim, H.T., Kim, H.T. & Lee, D.Y., 2019. Study on the skin-frictional

drag reduction phenomenon by air layer using CFD technique. *International Journal of Naval Architects and Ocean Engineering*, 56(4), pp.361-372.

Larsson, L. & Raven, H.C., 2010. *The principles of naval architecture series: ship resistance and flow*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Lee, J.D., et al., 2017. Full scale applications of air lubrication for reduction of ship frictional drag. *SNAME Maritime Convention 2017*, Houston, USA, 23-28 October 2017.

Mizokami, S. et al., 2010. Experimental study of air lubrication method and verification of effects on actual hull by means of sea trial. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47(3), pp.41-47.

Naval Ship's Technical Manual. 2002. Waterborne Underwater Hull Cleaning of Navy Ships, Publication #S908-CQ-STM-010/CH-081R4. Naval Sea Systems Command.

Nikuradse, J., 1933. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. *VDI-Forschungsheft* 361.

Schiller, L., & Naumann, A., 1933. Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung. *VDI Zeits*, 77(12), pp.318-320.

Schlichting, H., 1979. *Boundary layer theory*. Springer.

Schultz, M.P., 2004. Frictional drag of antifouling coating system. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 126:1039-1047.

Silberschmidt, N., Tasker, D., Pappas, T. & Johannesson, J., 2016. Silverstream system – air lubrication performance verification and design development. *Conference of Shipping in Changing Climate*, Newcastle, UK, 10-11 November 2016.

Tanaka, T., 2011. Green technologies featuring the Mitsubishi air lubrication system. *1st World NAOE Forum*, Osaka, Japan, 25 November 2011.

Tomiyaama, A., Tamai, H., Zun, I. & Hosokawa, S., 2002. Transverse migration of single bubbles in simple shear flows. *Chemical Engineering Science*, 57, pp.1849-1858.

