



SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

선박 설계를 위한 실선 스케일 시뮬레이션

선박 및 해양 구조물 유체에 대한 CFD 사용 가치 증대

개요

선박 설계 분야에서 CFD (전산 유체 역학)가 사용되는 비중이 점차 늘어나고 있습니다. 일반적으로 CFD는 시험용 탱크 검증 데이터와 비교하기 위해 모형선 스케일로 실행됩니다. 이 백서는 실선 스케일 CFO 실행을 꺼리는 일반적 시각에 대해 알아보고, 실제 운영 조건 하의 실선 스케일 설계 해석을 권장하고자 합니다. 실선 스케일 시뮬레이션은 여러 사례에서 다른 방식에 비해 한층 뛰어난 정확성과 안정성을 보였으며, 이는 설계 성능에 대한 이해를 높이는 결과로 이어집니다.

Professor Milovan Perić

목차

요약.....	3
벽 경계층.....	4
유동 특징 형상에 대한 레이놀즈 수 효과.....	7
캐비테이션에 대한 축척 효과	9
에너지 절약과 유동 제어 기기에 대한 크기 효과.....	11
실선 스케일 검증 데이터	12
결론.....	13
참조.....	13

요약

선박 건조 및 해양 엔지니어링을 비롯한 많은 분야에서 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식에 기반한 유동 시뮬레이션이 보편적으로 사용되고 있습니다. 이러한 방식은 CFD (전산 유체 역학)로 알려졌으나, 포텐셜 흐름 이론에 기반한 시뮬레이션 방식도 엄밀히 말해 CFD에 포함됩니다. CFD는 자동차 및 항공우주 엔지니어링 등 많은 분야에서 모형선 실험을 대체하는 수단으로 자리매김했으나, 해양 산업에서는 실선 스케일 시뮬레이션에 사용할 수 있는 방식으로 아직 신뢰받지 못하고 있습니다.

CFD와 모형선 스케일 측정 데이터를 비교한 자료를 보면 시뮬레이션으로 선체 저항, 프로펠러 추력, 캐비테이션 패턴, 파형의 추가 저항, 파형-구조물 상호작용 등을 안정적으로 예측할 수 있다는 증거가 많습니다. 그러나 실선 스케일 CFD 적용에 대해서 만큼은 여전히 회의적인 시각이 존재합니다. 이와 같은 회의적 시각의 이면에는 레이놀즈 수가 그 정도로 높으면 시뮬레이션 시 벽면 경계층이 정확하게 처리되지 않을 것이란 의구심이 자리하고 있습니다. 또한 실선 스케일 측정을 통해 얻은 테스트 데이터가 제한적이라 검증이 용이하지 않을 수 있다는 우려 사항도 있습니다.

본 백서의 목적은 실선 스케일 시뮬레이션에 CFD 사용을 권장하기 위함입니다. 실선 스케일로 올바르게 실시한 CFD 예측 정확도는 모형선 스케일로 실시한 것과 비교해 별반 차이가 없으며, 결과물 신뢰도 역시 모형선 스케일 실험에서 실선 스케일로 외삽한 결과물의 신뢰도와 별반 차이가 없음을 확신합니다. 오히려 실선 스케일 예측의 정확도와 신뢰도가 더 높은 경우가 많았습니다. Simcenter™ STAR-CCM+™ 소프트웨어 사용경험이 바로 이러한 확신을 뒷받침하는 증거입니다.

벽 경계층

RANS 방정식의 수치 해석 품질을 결정하는 두 가지 요인이 있습니다. 1) 수치 격자의 품질과 해상도 2) 벽 경계 난류 모델 및 처리 Simcenter STAR-CCM+는 고품질 격자 생성에 필요한 모든 도구와 특징 형상을 제공하므로, 이 문제는 자세히 다루지 않겠습니다. Simcenter STAR-CCM+는 다양한 RANS 난류 모델 (층류에서 난류로의 상태 전환 모델링을 위한 변형을 포함한 $k-\epsilon$ 및 $k-\omega$ 와류 점성 모델의 여러 변형과 레이놀즈 응력 모델의 여러 변형)을 비롯해 LES (large-eddy simulation) 유형 모델 및 두 방식의 조합, DES (detached-eddy simulation) 변형을 제공합니다. 벽 처리를 위해서는 low-Re (저 레이놀즈 수)라고 불리는 접근 방식(격자가 경계층을 점성 하위 레이어로 해석)과 high-Re (고 레이놀즈 수) 벽 함수, 두 방식의 조합("모든- y^+ 벽면 처리")을 사용할 수 있습니다.

가능한 경우 최대한 low-Re 방식을 사용할 수 있도록 경계층을 해석하는 것이 좋습니다. 적정 메시는 벽 근처에 여러 개의 경계층 (일반적으로 약 20개)을 필요로 하며, 셀 카운트를 낮게 유지하려면 이러한 경계층 셀은 종횡비가 높은 박형 셀이어야 합니다. 평면 표면에서는 이러한 박형 셀이 문제가 되지 않지만, 벽면이 굽은 경우 벽면 접선 방향으로 격자를 세분화해야 합니다. 여기에는 두 가지 이유가 있습니다. 1) 격자 라인이 벽면 곡률에 맞게

정렬되지 않으면 셀이 왜곡되며, 정확도와 안정성 면에서 왜곡 크기는 너무 크면 안됩니다 2) 굽은 벽면을 따라 속도 및 압력 모두 벽면 접선 방향 나아갈수록 크게 달라지는데, 이 편차가 적절히 해결되어야 합니다. 그림 1은 모형선 스케일의 컨테이너 선미 부분 경계층의 박형 셀 왜곡을 보여줍니다. 이 격자는 벽면 법선 방향에서 볼 때 문제가 없으나 ($y^+ \approx 1$ 가 됨), 벽면 접선 방향에서는 그렇지 않은 모습이었습니다. 셀 두께 0.03mm, 측면 셀 크기 약 18mm, 종횡비 약 650이고, 1/둘 모형선에서 전체 약 200만 개 셀에 20개 경계층이 사용됩니다. 벽면 접선 방향으로 격자를 세분화해 종횡비를 약 200 정도로 줄이면 왜곡이 해소돼 격자 품질이 적정 수준이 되지만, 셀 개수가 약 1,000만 개까지 증가합니다.

레이놀즈 수는 모형선 스케일보다 실선 스케일에서 훨씬 높으며, 점성 하위 레이어 (선박 길이에 따라 배율 조정된 경계층 두께가 모형선 스케일 대비 얇아 실선 스케일의 점성 하위 레이어가 더 얇음)를 해석하려는 경우, 벽면 법선 셀 크기가 선박 길이와 비슷한 수준이면 벽 근처 경계층 내 종횡비가 불가피하게 더 높아집니다. 이로 인해 종횡비를 허용 가능한 값 (200 이하)으로 줄이려면 벽면 접선 방향으로 상당한 격자 세분화가 이뤄져야 하며, 이는 셀 수가 대폭 증가하는 결과로 이어집니다 (약

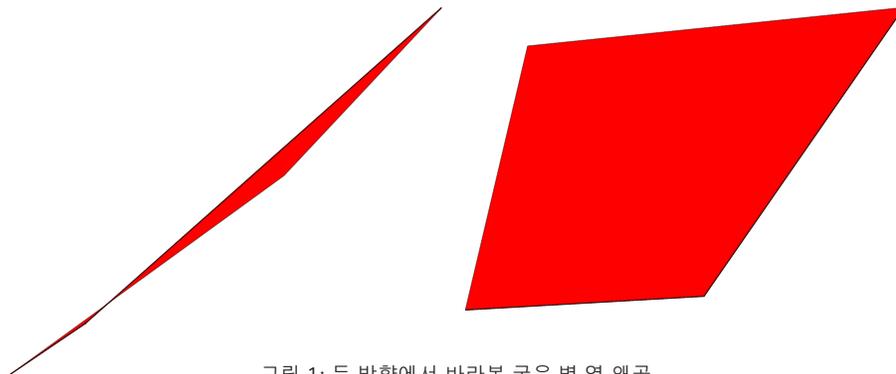


그림 1: 두 방향에서 바라본 굽은 벽 옆 왜곡 프리즘 셀

1억 개). 몇 가지 산업 적용 사례를 보면 이 정도 셀 수는 일반적인 수준이 되었으며 현재 추세를 감안하면 앞으로 몇 년 내에 이 정도 격자는 일반화될 것으로 전망되나, 설계단 시뮬레이션이나 최적화 작업에는 너무 방대하다는 인식이 있습니다.

벽 처리를 위한 또 다른 방식은 소위 벽 함수라고 불리는 기능을 사용하는 것입니다. 격자는 경계층 로그 부분만 해석하고, 점성 하위 레이어 및 버퍼 레이어는 해석되지 않은 상태로 둡니다 (경계층 벽 법선 방향에서 일반적인 속도 프로파일은 그림 2 참조). 몇 가지 추가 가정 (일부 조건에 국한됨. 전체 선체 적용 안됨)을 사용해 벽면 옆의 셀 중심의 변수 값을 기준으로 벽 전단 응력을 계산할 수 있습니다. 경험을 토대로 보면 벽에서 첫 번째 셀 중심까지의 무차원 거리, 즉 y^+ 가 50~100 사이인 경우 모형선 스케일 연구 (실험에서 얻은 검증 데이터가 충분한)에서 적절한 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났습니다. 예를 들어 현대 중공업은 모형선 스케일에서 약 200개의 선체 형상을 사용해 선체 저항을 계산하고 이를 실험 결과와 비교했습니다. 예상 값과 측정 값 사이의 편차가 2% 미만인 경우가 대부분이었습니다.

상기 내용에 기반해 보면 점성 하위 레이어의 해석 (첫 번째 경계층 중심에서 하나의 y^+ 값을 말함)에는 과도하게 정밀한 격자가 필요하므로 실선 스케일 해석에는 벽 함수를 사용하는 것이 적합합니다. 그러나 y^+ 값이 50~100만 되어도 종횡비와 왜곡 셀 수가 증가합니다. 모형선 스케일 해석에 사용되는 격자를 확장하기만 해도 첫 번째 셀 중심에서 y^+ 값이 10,000 정도로 과도하게 높아집니다. 그러므로 모형선 스케일 연구에 기반해 신뢰할 수 있는 수준의 범위 내에서 벽면 셀 중심에 가까운 y^+ 값을 얻으려면 그리드를 극도로 세분화해야 하는데, 이 때문에 실선 스케일 CFD는 비용 부담이 너무 크다고 생각하는 이들이 많습니다.

공히 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 벽 함수를 사용할 때 실선 스케일과 모형선 스케일 모두 실제로 동일한 y^+ 값을 필요로 하는지 여부를 확인하기 위해 간단한 해석을 해보겠습니다. 해양 엔지니어링에서 모형선 실험은 동일한 프루드 수를 적용해 실시합니다.

$$Fn = \frac{U}{(gL)^{1/2}}$$

U 는 선박 속도, g 는 중력 가속도, L 은 선박 수선 길이입니다. 따라서 s 배 확장된 선박 모형의 경우, 모형선 길이와 실선 스케일 선박 길이의 관계는 다음과 같습니다.

$$L_{mod} = \frac{L_{full}}{s}$$

선박 속도는 다음과 같이 증가합니다.

$$U_{full} = Fn g^{1/2} (L_{mod}s)^{1/2} = U_{mod}s^{1/2}$$

그러므로 실선 스케일에서는 모형선 스케일보다 레이놀즈 수가 훨씬 큼니다. (동일 유체와 물, 공기로는 유사한 프루드 및 레이놀즈 수를 얻을 수 없습니다.)

$$Re_{full} = \frac{u_{full}L_{full}}{\nu} = Re_{mod}s^{3/2}$$

여기에서 ν 는 물의 동점성 계수를 나타냅니다.

이제 경계층에 대한 레이놀즈 수 불일치에 따른 결과를 살펴보겠습니다. 우리가 관심있는 부분은 정성 평가이므로, 간단한 평판 지오메트리를 살펴보겠습니다. 평판에서 경계층 두께는 다음과 같이 증가합니다.

$$\delta_x \simeq 0.382xRe_x^{-1/5}$$

Re_x 는 판 길이인 x 에 따른 레이놀즈 수입니다. 그러므로 경계층 두께는 다음과 같이 조정됩니다.

$$\delta_L^{full} = 0.382L_{full}Re_{full}^{-1/5} = \delta_L^{mod}s^{7/10}$$

이는 실선 스케일의 경계층이 모형선 스케일보다 얇다는 뜻입니다.

피부 마찰 계수 C_f 는 근사 조정값은 다음과 같습니다.

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U^2} \simeq 0.074Re_x^{-1/5}$$

여기서 τ_w 는 벽 전단 응력이고 ρ 는 물 밀도입니다. 따라서 실선 스케일과 모형선 스케일 벽 전단 응력 간 관계는 경계층 두께 관계와 동일합니다.

$$\tau_w^{full} = \tau_w^{mod}s^{7/10} = \tau_w^{mod}s^{0.7}$$

단순히 실선 스케일 격자를 얻기 위해 최적의 모형선 스케일 격자를 s 로 배율 조정 한 경우, y^+ 는 어떻게 될까요? y^+ 는 벽면 전단 응력의 제곱근과 벽까지의 거리에 비례합니다.

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad \text{where} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

여기서 y 는 벽까지의 거리입니다. 벽 전단 응력 스케일링과 거리에 대한 s 스케일에 대해 위의 수식을 사용하면 다음과 같은 결과가 나옵니다.

$$y_{full}^+ = y_{mod}^+ s^{27/20} = y_{mod}^+ s^{1.35}$$

스케일 계수 $s = 50$ 의 경우, 모형선 스케일에서 벽 근처 첫 번째 셀에서 계수가 $y^+_{mod} = 50$ 이 되면, 실선 스케일(메시가 단순히 s 로 확장되는 경우)에서는 $y^+_{full} = 9,830$ 이 됩니다. 수치가 너무 높습니다. 모형선 스케일과 동일하게 $y^+_{full} = 50$ 을 달성하려면 벽 옆 셀 두께를 약 200배 줄여 동일 비율로 실선 스케일 종횡비를 모형선 스케일 종횡비보다 크게 만들어야 합니다.

하지만 y^+ 값은 모형선 스케일과 실선 스케일에서 같을 필요가 없습니다. 속도 프로파일에서 로그 범위는 레이놀즈 수에 관계없이 y^+ 와 거의 동일한 값에서 시작되지만, 레이놀즈 수가 증가하면서 y^+ 값도 대폭 증가합니다. 이는 시공간 모두에서 모든 난류 특징 형상을 해석하는 시간 단계를 사용한 격자 계산인 DNS (직접 수치 시뮬레이션)에서 확인할 수 있습니다. 그림 2는 DNS 시뮬레이션에서 얻은 네 가지 레이놀즈 수에서의 평면 채널 속도 프로파일을 보여줍니다.

컴퓨팅 리소스가 제한적이라고 레이놀즈 수에 DNS를 적용할 수 없지만, 레이놀즈 수가 최고값일 때 로그 범위가 어떻게 최대 $y^+ = 2,000$ 까지 증가하는지 명확하게 살펴볼 수 있습니다. 표시된 레이놀즈 수는 마찰 속도 u_τ 로 정의되며, 최대값은 채널 높이와 평균 속도 250,000을 기준으로 하는 레이놀즈 수에 상응합니다. 프린스턴 대학에서 실시한 수퍼파이프 실험에서 얻은 데이터(연구실에서 실험상 연구한 가장 높은 레이놀즈 수 유동 포함)를 보면 로그 범위가 $y^+ \approx 100,000$ 까지 확장되는 것을 알 수 있습니다. 로그 법칙 연구에 대한 자세한 사항은 Wosnik et al (2000)¹ 및 Lee와 Moser(2015)²의 논문을 참조하십시오.

위 내용은 실선 스케일과 모형선 스케일에서 벽면 옆 첫 번째 계산점을 동일한 무차원 거리에 배치하는 것은 (예: $50 \leq y^+ \leq 100$) 실용적이지 않으며 필요하지도 않음을 시사합니다. 로그 범위 내 계산 점 갯수만 동일하면 됩니다. 모형선 스케일 시뮬레이션의 경우 레이놀즈 수가 매우 크지 않으면 로그 범위가 짧으며, 그러므로 범위 내에서 낮은 y^+ 값으로 시작할 수 있습니다. 실선 스케일에서는 로그 범위가 훨씬 더 큰 y^+ 값으로 확장되므로 1,000보다 큰 값으로 시작할 수 있습니다.

모형선 및 실선 스케일에서 로그 범위 내에 동일한 수의 계산점을 배치하고, 로그 범위의 총 너비에 비례하게 이들을 동일한 방식으로 분포하는 것이 적절합니다. 위에서 볼 수 있듯 실선 스케일의 로그 범위는 모형선 스케일보다 약 2배 정도 많은 y^+ 값으로 확장됩니다.

실선 및 모형선 스케일의 경계층 내에서 동일한 상대적 위치에 계산점을 배치하는 경우, y^+ 값 비율은 다음과 같습니다.

$$y_{full}^+ \simeq (\tau_w^{mod} s^{7/10})^{1/2} \delta_L^{mod} s^{7/10} = y_{mod}^+ s^{21/20} = y_{mod}^+ s^{1.05}$$

위에 사용된 예($s = 50$)에서 $y^+_{mod} = 50$ 의 경우, 해당 실선 스케일 값은 $y^+_{full} = 3,040$ 이 됩니다. 따라서 경계층 내 계산점을 동일하게 분포하려면 벽 근처 셀은 모형선 스케일에서 확장된 셀 크기보다 3.23배 얇아져야 합니다. 스케일 계수가 $s = 30$ 이면, 비율은 2.77이 됩니다. 즉, 모형선 스케일보다 실선 스케일에서 필요한 경계층이 두 세 개 더 많으므로, 실선 스케일에서 축소된 벽면 근처 셀 두께는 모형선 스케일에서의 최적 셀 두께보다 약 3배 정도 얇습니다.

물론 로그 범위 내에 해당하는 한 실선 스케일에서 낮은 y^+ 값을 격자에 사용하는 것도 가능합니다. 모형선 스케일에서 점성 하위 레이어를 해석한 격자를 예로 들어보면, 실선 스케일 크기로 확장될 경우, y^+ 값 범위가 약 200으로 증가합니다. 곡선 표면에서 접선 방향으로 격자가 충분히 세분화된 경우라면 이 수치는 범위상 문제될 것이 없습니다. 세분화가 덜 된 격자라면 과도한 셀 종횡비와 왜곡을 방지하기 위해 더 높은 y^+ 값을 사용해야 합니다.

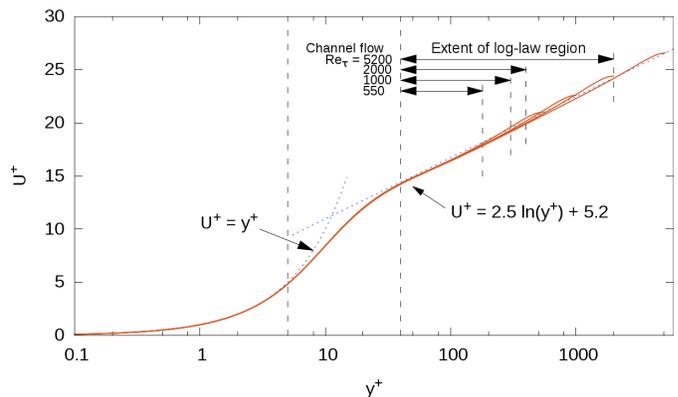


그림 2: 이는 경계층 내 속도 프로파일이 DNS로 시뮬레이션된 평면 채널에서 완전 발달 유동에 대한 레이놀즈 수의 함수로 변형된 모습을 보여줍니다 (출처: 여러 데이터베이스).

레이놀즈 수가 유동 특징 형상에 미치는 영향

속도 또는ジオ메트릭 크기 증가로 레이놀즈 수가 증가하면 유동 특징 형상이 크게 달라질 수 있습니다. 잘 알려진 예시로는 층류에서 난류로 변환되는 경우가 있습니다. 실선 스케일 선박에서는 구상 선수의 일부분만 층류 경계층으로 덮입니다. 표면의 매끄러움에 따라 이 부분이 결정됩니다. 표면이 거칠면 난류로 전환되는 시점이 앞당겨집니다. 모형선 스케일에서는 칠을 새로운 1/4 가량의 매끄러운 공간이 층류에 해당할 수 있습니다. 이 때문에 실선 스케일 유동을 예측하기 위해 모형선 스케일 유동에서 획득한 실험 데이터 외삽을 사용하는 것이 실질적으로 불가능합니다. 이 문제는 트리핑을 사용해 해결합니다. 이 경계층은 "적절한" 선수 위치에서 난류로 전환되므로, 대부분의 선체 표면은 난류 경계층 아래에 있습니다. 하지만 연구실마다 사용하는 트리핑 매커니즘과 (샌드 페이퍼 또는 트립 와이어부터 직경과 길이가 다양한 특수 핀 패턴까지) 외삽 절차가 다르므로 이 방식은 신중하게 조정할 필요가 있습니다.

이 방식은 표준 선박 형상에서 대체적으로 잘 작동하지만 (해상 시범 운항을 통해 얻은 대량의 데이터와 검증 이력 존재함), 최적의 경계층 트리핑은 선체 형상과 레이놀즈 수가 결정하므로 새로운 형상에는 시행착오가 있게 마련입니다.

CFD에서 실선 스케일은 모형선 스케일보다 문제가 덜합니다. 전체 벽 표면이 난류 경계층으로 덮여 있다는 가정을 해볼 수 있는데, 이는 층류-난류 변환과 관련된 불확실성을 해소합니다. 모형선 스케일에서 독립 경계층 개발(프로펠러 날개, 에너지 절감 장치 및 그 외부가물)이 있는 부분에 대한 유동 시뮬레이션을 하려면 트리핑을 적용하는 대신 난류 전환을 모델링하는 작업이 필요합니다. Simcenter STAR-CCM+에는 층류-난류 전환용 모델이 포함되어 있지만, 체인 내에서 가장 약한 링크이기도 한데 변환을 결정짓는 요소가 여럿이기 때문입니다(자유 스트림 난류, 표면 거칠, 압력 구배 등).

유동 특징 형상에서 또 하나의 중요한 변화는 경계층이 분리에 앞서 난류가 된 후 난류 항적(저 레이놀즈 수에서 나옴)이 있는 층류 분리가 난류 분리로 전환될 때 여러 블러프 바디와 함께 일어납니다. 이로 인해 항력위기라고 부르는 현상이 발생합니다. 잘 알려진 예로 원형 실린더와 구 주위 유동이 있습니다. 그림 3은 매끄러운 표면과 거친 표면을 가진 구에 대한 항력 계수의 질적 변수를 보여줍니다. 이는 항력위기와 표면 거칠에 대한 의존도를 나타냅니다. 실린더형 구조와 그 외 블러프 바디에 대해서도 비슷한 변수를 얻을 수 있습니다.

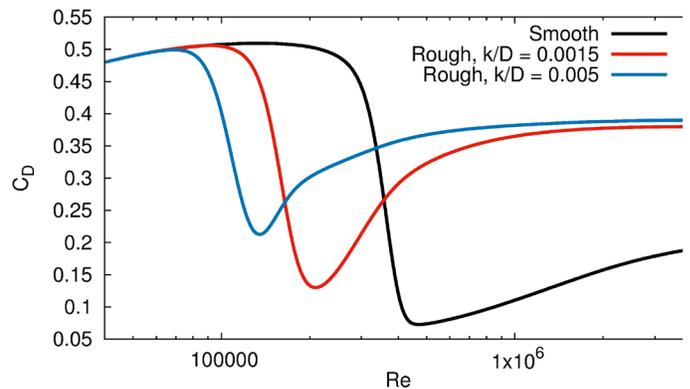


그림 3: 매끄러운 표면과 여러 거친 표면에 대한 레이놀즈 수를 활용한 구 항력 변형

(자유 표면과 파동 현상을 감안해) 프루드 상사성을 적용해 모형선 스케일로 실험을 진행하면 레이놀즈 수는 실선 스케일로 진행할 때보다 훨씬 작아집니다. 모형선 스케일에서 레이놀즈 수가 아임계 영역에 있는 경우(항력 위기 전), 실선 스케일 상태를 정확하게 예측하는, 신뢰할 수 있는 외삽을 찾기 어렵습니다. 저 레이놀즈 수 영역으로 항력위기를 옮기는 표면 거칠을 사용해 유동이 모형선 스케일에서도 초임계가 되도록 이른 난류 전환을 유도할 수 있습니다(그림 3 참조). 그러나 그림 3에서 볼 수 있듯

표면 거침은 마찰이 항력에 미치는 영향을 높이므로, 표면이 매끄러운 초임계 레이놀즈 수 범위에서보다 현저히 높게 유지됩니다. 이는 모형선 스케일 실험에서 실선 스케일 유동으로 외삽하는 작업을 어렵게 만듭니다. 모형선 스케일 실험에서 실선 스케일 속성을 예측하려면 가용한 실선 스케일 데이터로 외삽 절차를 조정해야 합니다. 문제는 신규 건조 선박의 시험 운항 데이터가 제한적이라는 점입니다. 해양 구조물의 경우, 조정 작업에 쓸 수 있는 데이터가 훨씬 더 부족합니다. 또한 수량이 변경되면 조정도 변경해야 합니다. 예를 들어 선박 저항에 맞게 외삽을 조정한다고 해도, 항적 내에서 부가물 주위 속도장이 반드시 동일한 방식으로 확장되지는 않습니다.

항력 위기가 없더라도 모형선 스케일과 실선 스케일의 유동 특징 형상은 현저히 다를 수 있습니다. 일반적으로 매끄러운 표면으로부터의 유동 분리는 레이놀즈 수에 크게 의존하며 확장이 어렵습니다. 레이놀즈 수가 대폭 증가할 경우 바디 이면에 다른 항적이 발생해 분리 영역의 너비와 길이 모두 크게 달라질 수 있습니다. 항력도 대개 크게 달라집니다. 모형선 스케일 유동은 실선 스케일 유동과 비슷하지 않을 수 있어 레이놀즈 수 공간 내 외삽이 어려워집니다.

이 현상을 보여주는 예시가 그림 4에 나타나 있습니다. 원형 전면 에지가 있는 사각 실린더 주위 난류 유동 연구를 500,000과 5,000,000 이라는 두 가지 레이놀즈 수로 진행해 보았습니다. 두 사례 모두 평균 유동 속도는 12.5m/s입니다. 두 번째 사례에서 레이놀즈 수는 동일 계수로 기하메트리를 확장해 10배 커졌습니다. 첫 번째 사례의 실린더 너비는 0.6m, 곡률 반경은 5mm, 두 번째 사례는 각각 6m 및 50mm입니다. 레이놀즈 수가 증가하면서 유동 패턴도 크게 달라집니다. 모형선 스케일 실험을 의미하는 저 레이놀즈 수에서는 원형 전면 에지에서 유동이 더 빨리 분리되어 실선 스케일 유동을 의미하는 고 레이놀즈 수에서보다 큰 각도를 형성했습니다. 그 결과 모형선 스케일에서는 전면 에지 분리에서 나온 재순환 영역이 실린더 이면의 재순환에 합류하는 반면, 실선 스케일에서는 이들 영역이 분리됐습니다. 항력 계수는 낮은 레이놀즈 수 (1.1)에서 높은 레이놀즈 수 (0.66)의 거의 두 배이며,

원형 모서리 주위의 최대 속도는 29.1m/s와 23.4m/s로 실선 스케일에서 훨씬 높습니다. 이를 통해 이러한 유형의 유동의 경우, 모형선 스케일 실험에 기반해 실선 스케일 유동 동작을 예측하기가 대단히 어렵다는 점을 분명히 알 수 있습니다.

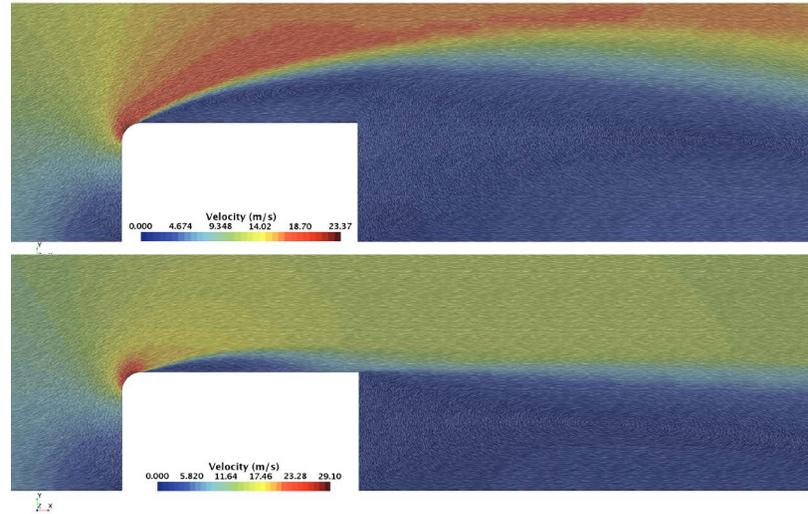


그림 4: 원형 코너를 활용한 사각 실린더 유동 분리 레이놀즈 수 500,000(이상) 및 5,000,000(이하).

위 내용에 따르면, 프루드 수와 레이놀즈 수 모두를 일치시킬 수 없다는 점이 실험 결과에 중요한 문제로 작용했음을 알 수 있으며, 유사한 형상을 사용한 실험 이력이 없는 신규 설계를 해석할 경우 특히 그러합니다. 반면에 실선 스케일에서는 모형선 스케일에서 하는 것처럼 쉽게 CFD를 수행할 수 있습니다. 두 경우 모두 불확실성이 발생하는 원인은 동일합니다. 1) 격자 품질 및 해상도(이산화 오차) 및 2) 난류 모델링(모델링 오차). 두 경우 모두 모델링 오차 유형과 종류가 같을 가능성이 높습니다. 이산화 오차 유형을 동일하게 유지하기 위해서는 이전 섹션에서 설명한대로 벽 근처 경계층을 세분화해야 합니다.

캐비테이션에 대한 축척 효과

캐비테이션은 계산 격자에서 각 증기 기포를 해석할 여유가 없어 모델링이 필요한 또 하나의 물리적 현상입니다. 캐비테이션 모델을 사용하면 시뮬레이션에 모델링 오류가 추가로 발생합니다. 그러나 캐비테이션의 실험적 해석도 문제의 소지가 있으며, 캐비테이션 터널 데이터에 기반한 실선 스케일 동작 예측도 늘 신뢰할 수 있는 것은 아닙니다. 앞서 설명한대로 그 이유는 모형선 및 실선 스케일 유동의 완전 상사를 얻을 수 없기 때문입니다. 실험은 일반적으로 자유 수면없이 캐비테이션 터널에서 수행되지만, 실제 환경에서는 프로펠러 상단에 균일하지 않은 자유 수면이 있습니다. 선박이 파형 내에서 이동할 때 프로펠러 침수가 임계 수준 이하면 환기가 일어날 수 있는데, 이는 캐비테이션 터널에서는 쉽게 시뮬레이션 할 수 없습니다. 누락된 자유 수면을 반영하려면 설계 정수면 상부에 있으며 정수면 방향으로 기울어진 평면 상의 상부 터널 벽에 선박 모델을 부착합니다. 이렇게 하면 흡수 및 증동요 각이 효과적으로 변경됩니다. 실선 스케일에서 프로펠러 성능 예측 수준을 높일 수 있도록 이 조정법 구체화한 분명한 공식은 없습니다. 예인 수조 시설마다 경험적 절차를 갖추고 있습니다.

실험에서 발생하는 문제 중 하나로 모형선 및 실선 스케일 프로펠러의 지오메트리 충실도가 있습니다. 실제 프로펠러는 직경이 약 10m이지만, 모형선은 직경이 0.2m 가량입니다. 블레이드 전연부 및 후연부와 블레이드 거칠기 곡률은 모형선 스케일에서 정확하게 재현하기 어렵습니다. 또 다른 문제로는 층류에서 난류 유동 영역으로의 전환이 있습니다. 그러나 가장 큰 문제는 모형선 프로펠러 직경이 짧다는 점인데, 실선 스케일 프로펠러보다 훨씬 빠른 (10-20배) 속도로 회전합니다. 또한 실선 스케일에서 정수압은 막대 길이에 따라 달라지지만, 모형선 스케일에서 변수는 간과할 수 있는 수준입니다. 결과적으로 캐비테이션 패턴은 모형선과 실선 스케일에서 확연히 달라집니다. 그림 5는 동일한 프로펠러에 대한 증기 체적율이 5% 이상인 영역을 보여주며, 이는 모형선 및 실선 스케일 시뮬레이션에서

얻은 결과입니다. 모형선 스케일 시뮬레이션에서는 모든 블레이드가 거의 상시적으로 캐비테이션의 영향을 받지만, 실선 스케일 시뮬레이션에서는 캐비테이션이 프로펠러 블레이드에 나타나는 시간이 회전 중 일부에 불과합니다. 시뮬레이션에서 모형선 스케일의 경계 조건은 실험 설정과 동일한 반면, 실선 스케일에서는 프로펠러가 자유 수면 변형을 계산하면서 이동 중인 선박에 부착된 채 회전할 때 적절한 환경 조건을 고려합니다. 그러므로 시뮬레이션에서 발생하는 추가 불확실성은 캐비테이션 모델에서 발생하는 한 가지 뿐입니다. 자유 수면 (평면 또는 파형)과 선박 운동을 고려하는데 문제가 발생하거나 과도한 노력이 들지 않습니다.

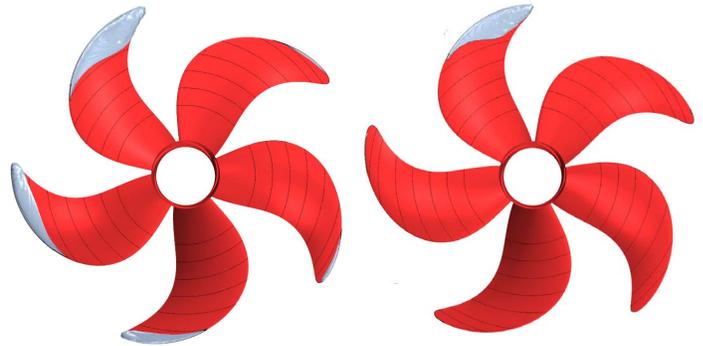


그림 5: 선체와 러더 사이에서 작동하는 프로펠러 상에서 예측된 캐비테이션 패턴: 모형선 스케일(좌측)의 캐비테이션 터널과 실선 스케일(우측)의 자유 수면.

이산화 오차가 훨씬 적고 실제 유동에 대한 신뢰할 수 있는 정보가 있어야만 모델링 오차를 평가할 수 있습니다. 프로펠러 캐비테이션의 경우, 모형선과 실선 스케일 모두에 상당량의 유동 시각화 데이터가 있으며 이는 캐비테이션 영역을 보여줍니다. 반면 프로펠러 주위 비캐비테이션 유동에 대해 시뮬레이션과 측정 사이에서 적절한 합의가 이뤄졌으며, 격자 의존성 연구를 보면 추가 세분화를 한다고 해서 트러스트와

토크 상에 두드러진 변화가 일어나지 않는다는 점을 알 수 있습니다. 그러나 캐비테이션 유동에 동일한 격자를 적용할 때에는 팁 와류에서 캐비테이션이 발생하지 않습니다. 최근까지 이는 캐비테이션 모델 결함으로 인한 현상으로 여겨졌습니다. 최신 연구를 보면 격자가 로컬에서 적절하게 세분화 된 경우, Simcenter STAR-CCM+의 캐비테이션 모델이 팁 와류 내 캐비테이션 패턴을 올바르게 예측합니다. 그림 6은 비캐비테이션 유동에 적합한 격자와 로컬로 세분화된 격자를 통해 팁 와류 내에서 캐비테이션을 캡처하는 섹션을 보여줍니다.

그림 7에서 볼 수 있듯 로컬 격자 세분화 상당 수준 이뤄지지 않으면 팁 와류 내 캐비테이션이 캡처되지 않습니다. 그러나 와도 크기 기준 임계값으로 파악한 좁은 나선 영역 내 격자가 충분히 세밀화되면 팁 와류 캐비테이션이 제대로 나옵니다. 그림 7 경우를 보면 팁 와류 내의 셀 크기는 약 0.2mm입니다. 직경이 $D=250\text{mm}$ 인 모델 프로펠러에서는 이는 $D/1,000$ 보다 작은 셀 크기입니다. 실선 스케일에서는 팁 와류 직경이 더 넓으므로 격자 간격이 그렇게 작을 필요가 없지만 프로펠러 직경과 비슷한 수준이어야 합니다.

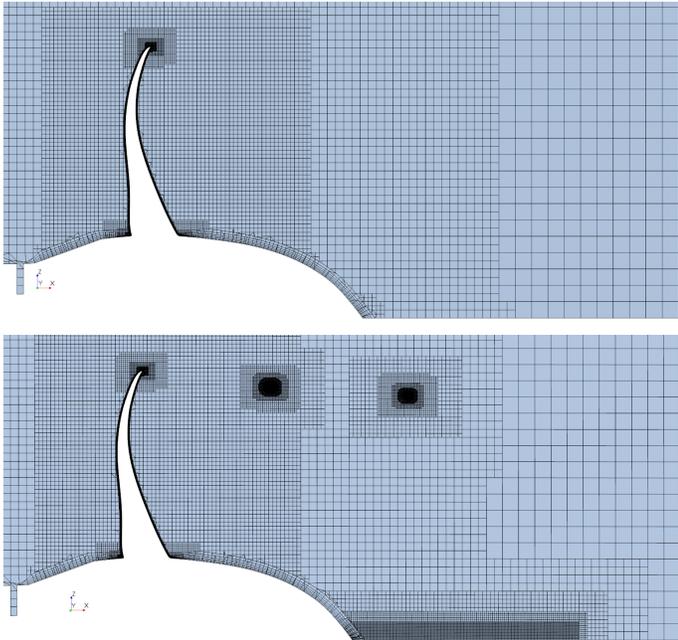


그림 6: 프로펠러 주변 캐비테이션 유동을 시뮬레이션하는데 사용한 계산 격자 (Marine Propulsors 2011 워크샵, smp'11 심포지엄에서 발표된 테스트 사례). 상단 이미지는 비캐비테이션 유동에 적합한 일반적 격자 설계를, 하단 이미지는 상당 수준의 로컬 세분화로 팁 와류를 해결하게끔 설계된 격자를 보여줍니다.

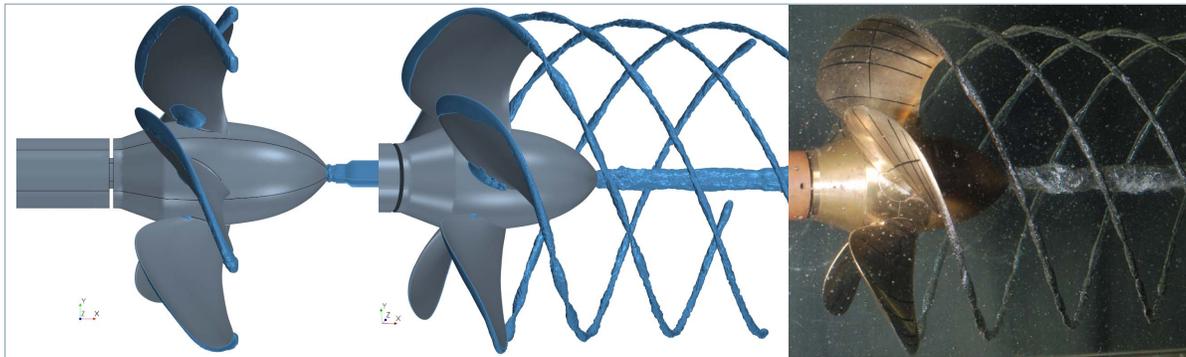


그림 7: 프로펠러 주위 유동 내 예상 캐비테이션 범위 (증기 체적률 0.05인 iso-surface로 표시). 그림 6에 나타난 두 가지 격자를 사용해 계산. 실험 시각화와 비교 (우측: SVA Potsdam 제공)

에너지 절감 및 유동 제어 장치에 대한 축척 효과

에너지 절감 및 유동 제어 장치는 선박 크기에 비해 차지하는 공간이 작습니다. 그 외 선박 부가물이나 해양 구조물 상의 소형 지오메트리 구조물도 라이저나 파이프, 케이블, 그 외 해양 플랫폼 소형 부품 등과 같은 주요 구조물에 비해 크기가 작은 경우가 많습니다. 이와 같이 기하학적 규모가 작은 특징 형상은 유동에 상당한 영향을 줄 수 있으며, 제대로 설계될 경우 에너지 절감 효과를 거둘 수 있고 와류 진동 및 구조적 진동을 방지할 수 있습니다.

이러한 소형 구조물과 관련해 발생할 수 있는 문제는 이들이 유동으로 돌출될 때 그 길이에 기준한 레이놀즈 수가 모형선 스케일에서 아임계 상태가 될 수 있다는 점입니다. 예를 들어 해양 구조물의 실린더형 장치는 모형선 스케일에서 대규모 난류 항적과 층류 분리를 일으킬 수 있으며 (원형 실린더 주변 아임계 유동의 특징), 실선 스케일에서 경계층은 분리에 앞서 난류 상태가 되며, 재순환 영역이 크게 줄어듭니다. 핀과 스트럿, 그 외 호일형 구조물이 유동과 정렬되며, 모형선 스케일에서 정렬이 이뤄지는 경우, 레이놀즈 수가 증가하며 유입 유동 방향이 달라질 수 있어 실선 스케일에서 유동은 흡입 부분과 분리될 수 있습니다. 이로 인해 축소 모델을 사용해 에너지 절감 장치 및 이와 유사한 소형 구조물을

해석하고 특히 최적화하기가 어렵습니다. 실선 스케일로 실험을 진행하기는 어려울 수 있지만, 시뮬레이션의 경우 유동 영역 크기에 관계 없이 들어가는 수고는 비슷합니다. 실제로 실선 스케일에서 설계가 모형선 스케일에서 예상한 대로 이뤄지지 않는 경우, 실선 스케일 시뮬레이션을 사용해 이 문제를 해결했습니다.

실험을 통해 시뮬레이션하는 작업이 가진 최대 장점 중 하나는 유동에 대한 완벽한 정보를 제공한다는 점입니다. 바디 항력만 계산하는 경우라도 난류 정보와 소용돌이, 그 외 와류 식별 기준 등 다른 유도량과 더불어 전체 솔루션 영역에 대한 속도와 압력 필드를 얻을 수 있습니다. 유동 시각화 기능 (최근에는 가상현실 도구도 사용 가능)은 엔지니어가 문제 원인을 파악하거나 제품 개선 방법에 대한 아이디어를 얻을 수 있도록 지원합니다. 그림 8은 전단 응력 벡터 분포를 사용한 벽 근처 유동 시각화를 보여줍니다. 그림 9는 프로펠러 이면의 와류 구조와 러더 간 상호작용을 보여줍니다. 이와 같은 실선 스케일 유동 해석은 에너지 절감 장치 설계 및 최적화 시 필수적입니다. 현재 출시된 일부 장치는 사용자가 실선 스케일 유동 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터를 분석해 발명된 것입니다.

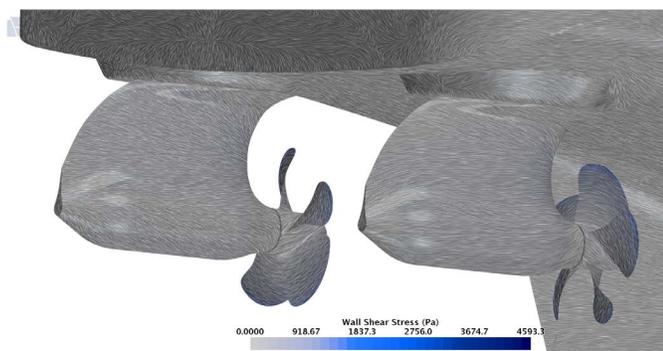


그림 8: 두 개의 Siemens eSIPOD 드라이브를 장착한 실선 스케일 선박 벽 표면에 가해지는 전단 응력 분포 예측. 이 예시는 특정 프로펠러 회전비를 활용한 자체 추진 시뮬레이션을 보여줍니다.

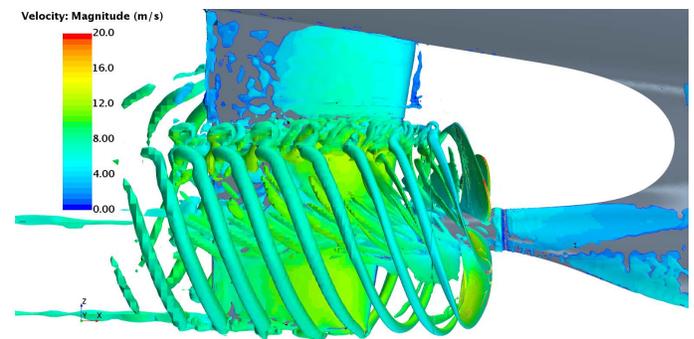


그림 9: 프로펠러와 러더 주변 Q-criterion (유동 내 와류 구조 식별에 사용)의 iso-surface 예측. 와류 크기별로 색상 지정.

실선 스케일 검증 데이터

실선 스케일 해양 구조물에서 얻을 수 있는 데이터 양은 제한적입니다. 로이드 선급협회는 최근 중형 선박 관련 여러 실선 스케일 측정 자료 중 하나를 전격 공개했습니다. 2016년 11월 로이드 선급협회는 20여 업체가 참여한 워크숍을 주최했으며, 업체는 앞서 공개한 측정 데이터로 시뮬레이션한 결과를 서로 비교했습니다. 과제는 세 가지 작동 조건에서 자체 추진점을 예측하는 것이었습니다. 각 테스트 사례에 제출된 결과물 중 60% 가량이 Simcenter STAR-CCM+를 사용해 생성한 것이었습니다. 실험 데이터와 가장 근접한 결과 (편차 1% 이내)도 Simcenter STAR-CCM+를 사용해 얻은 결과였습니다. 이 워크숍과 결과에 대한 자세한 내용은 관련 자료³를 통해 확인할 수 있습니다. 이 워크숍을 통해 전문 엔지니어가 최신 CFD 도구를 사용해 시뮬레이션을 수행할 경우, 실선 스케일로 선박 성능을 예측할 수 있다는 점을 알 수 있었습니다. 실선 스케일 유동 예측 시 시뮬레이션이 유용하게 사용된다는 점에 대한 더욱 입증하려면 더 많은 실선 스케일 데이터가 필요합니다. 실험 데이터는 제한적이지만, CFD 결과를 검증하는 방법은 여전히 유용할 수 있습니다. 예를 들어 신규 선박 인도에 앞서 해상 시험 운항을 진행할 때, 프로펠러 회전 함수와 같은 선박 속도 및 해상 상태 등의 데이터가 수집됩니다. 이러한 데이터는 검증 시 유용하게 사용할 수 있습니다.

고요한 해양 조건에서 최적화된 선박이 파도가 심한 운항 조건에서 최적 상태를 나타내지 않을 수 있다는 것은 이미 경험적으로든 시뮬레이션을 통해서든 인정되고 있는 사실입니다. 즉, 실선 스케일 시뮬레이션을 수행하는 것 뿐만 아니라, 해석 시 실제 운항 조건을 포함하는 것도 중요합니다. 그림 10에서 볼 수 있듯 선박 주변 파형 패턴은 진폭이 작은 파도만 있어도 크게 달라집니다. 이는 선박 저항과 속도 손실에 영향을 미칩니다 (두 가지 시뮬레이션 모두에서 프로펠러 회전 속도는 동일합니다). 해당 선박이 주로 사용될 환경을 파악하면 엔지니어는 선박 설계 및 최적화 시 여러 운항 조건을 고려할 수 있습니다.

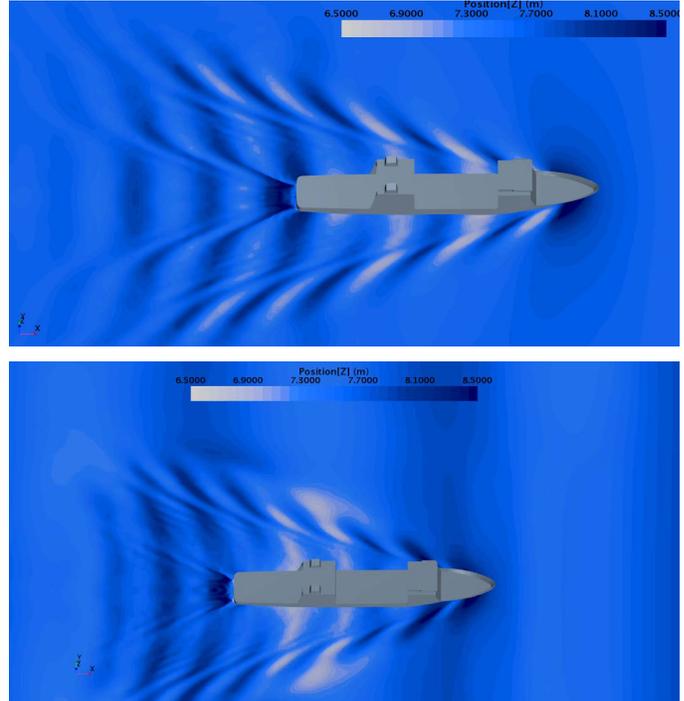


그림 10: 표시된 그림은 파도가 잔잔할 때 (상단)와 진폭 0.5m, 길이 190m인 실선 스케일 선박과 비슷한 깊이를 가진 장파장파가 있는 상황의 파형 패턴 예측을 보여줍니다. 이 예시는 그림 8과 동일한 선박에 특정 프로펠러 회전을 적용한 자체 추진 시뮬레이션을 보여줍니다.

결론

이 백서에서는 다양한 적용 분야에서 모형선 스케일 대신 실선 스케일로 CFD 시뮬레이션을 사용한 사례를 살펴봤으며, 이를 통해 해양 업계에서 실선 스케일 CFD 사용을 꺼리는 몇 가지 우려 사항을 해소하고자 했습니다. 벽 경계 층 요건과 레이놀즈 수 효과를 해석해 모형선 스케일 대비 실선 스케일로 시뮬레이션하는 것이 계산상 비용 부담이 더 크지 않으며, 결과 정확성도 실선 스케일로 모형선 실험을 외삽한 결과에 상응하는 신뢰도를 보이는 것으로 나타났습니다. 모형선 스케일을 확장하는 것보다 실선 스케일 예측이 더 안정적이며, 특히 아임계 레이놀즈 수를 사용할 때 더욱 그렇다는 점이 여러 사례를 통해 확인됐습니다.

비교와 검증에 사용할 실선 스케일 측정 데이터가 제한적이긴 하나, 2016년 11월 로이드 선급협회가 내놓은 결과를 보면, 여러 그룹이 자체 추진 시뮬레이션의 예측 속도/파워 곡선과 실험 데이터 간 편차 2%를 달성한 것을 알 수 있습니다. 또 다른 예로 실선 스케일 조건으로 실시한 작업 플랫폼 상의 wave-in-deck 하중 예측은 모형선 스케일로 수행한 확장 실험 데이터와 일치했습니다. Pakozdi et al (2015)⁴.

해양 부문의 많은 전문가들은 이미 일상 작업에 실선 스케일 조건을 사용한 CFD 시뮬레이션을 적용하고 있으며, 그 결과도 성공적입니다. 아직 망설이고 있는 이들은 이 분명한 추세를 따라 경험에 나설 차례입니다. Simcenter STAR-CCM+를 사용하면 실제 시스템의 디지털 트윈을 생성해 실제 운영 조건 하에서 완벽한 실선 스케일 시스템 해석을 수행하겠다는 목표를 달성할 수 있습니다.

참조

1. Wosnik, M., Castillo, L., George, W.K.: "A theory for turbulent pipe and channel flows," *Journal of Fluid Mechanics.*, vol. 421, pp. 115–145 (2000).
2. Lee, M., Moser, R.D.: "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau$ 5200," *Journal of Fluid Mechanics.*, vol. 774, pp. 395–415 (2015).
3. Lloyd's Register Workshop Proceedings link: <http://info.lr.org/112702/2017-0220/3m372v/12702/156863/Proceedings.zip>
4. Pákozdi, C., Östeman, A., Stansberg, C.T., Peric, M., Lu, H., and Baarholm, R.; "Estimation of wave-in-deck load using CFD validated against model test data," Paper No. ISOPE-I-15-586, ISOPE2015 Conference, Hawaii, 2015.

Siemens Digital Industries Software

본사

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

미주 지역

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

유럽 지역

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

아태 지역

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

Siemens Digital Industries Software 소개

Siemens Digital Industries Software는 엔지니어링, 제조 및 전자 설계가 미래와 만나는 디지털 엔터프라이즈를 실현하기 위한 혁신에 박차를 가하고 있습니다. Siemens Digital Industries Software의 솔루션은 규모를 막론한 기업이 조직에 새로운 인사이트와 기회, 혁신을 촉진할 자동화 수준을 제공하는 포괄적 디지털 트윈을 생성할 수 있도록 지원합니다. Siemens Digital Industries Software 제품과 서비스에 대한 자세한 사항은 [siemens.com/software](https://www.siemens.com/software) 를 방문하시거나 [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) 및 [Instagram](#) 계정 팔로우를 통해 확인하실 수 있습니다. Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow.

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2019 Siemens. 관련 Siemens 상표 목록은 [여기서](#) 확인할 수 있습니다. 기타 모든 상표는 해당 소유자에 귀속됩니다.
76061-81897-C15-KO 4/20 LOC