

전산유체역학을 이용한 제한수로에서의 선박 침하 해석

신현경^{1,†} · 최시훈¹
울산대학교 조선해양공학부¹

Analysis of Ship Squat in Confined Water Using CFD

Hyun-kyoung Shin^{1,†} · Si-hoon Choi¹
School of Naval architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan¹

Abstract

When a ship proceeds in confined water, like canal, the water ahead of ship is pushed by hull. This pushed water returns to the side and under the hull, and this returned water will make fluid velocity higher at the side and under the hull, compared to the case in the infinite water depth. Due to the higher velocity, the pressure under the hull will decrease, resulting in the ship drop. This phenomenon is called "ship squat" and ship squat will result in various marine accidents. In this paper, for predicting ship squat, numerical calculation was carried out using commercial CFD code, FLUENT. To confirm wave pattern profile around the ship, VOF (Volume of Fluid) method was applied. The calculated results were compared with other paper's results and empirical methods.

Keywords : Confined water(제한수로), Ship squat(선박 침하), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), VOF method(VOF 법)

1. 서론

천수에서의 선박 조종성능은 수심-흘수 비에 따라 좌우방향 힘과 선수동요 힘이 변하게 되어 그 특성이 변하게 된다. 또한, 선박이 운하나 항구와 같은 폭의 제한이 있는 수로에서 운항할 때, 좌우 비대칭인 수로의 특성이나 한쪽으로 치우쳐 운항하는 경우 등에 의하여 선체의 좌우 유동 특성이 달라져 선체가 벽면으로 빨려 들어가거나 선수 동요가 생긴다. 이와 같은 현상을 제방 효과(Bank Effect)라 칭한다.

한편, 선박이 천수에서 고속으로 운항할 경우 선저 부분에서의 유속은 증가하게 되고 베르누이 방정식에 의해 선저부분의 압력 강하 현상이 나타나게 된다. 이로 인하여, 선체에는 부력이 감소하는 효과가 생기게 되며 선체가 가라앉는 현상이 나타난다. 이와 같은 현상을 선박 침하(Squat)라고 하며, 이 같은 현상은 각종 해난사고를 초래한다. 실제로 1992년 Queen Elizabeth 2호는 스퀴트로 인해 좌초하였으며(Barrass and Derrett, 2006), 2000년 산적화물선인 Tecam Sea와 Federal Fuji는 같은 현상으로 인해 조종성능이 변화하여 서로 충돌하는 사고가 있었다(Trans-transportation Safety Board of Canada, 2008).

본 연구에서는 위와 같은 해난사고를 미연에 방지하기 위하여 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 개발한 선형인 KCS(Kriso Container Ship)를 이용하여 전산유체역학을 통해 선박 침하 해석을 실시하였다. 깊이 조건은 선박 흘수의 120%

(12.96m), 150%(16.2m), 그리고 250%(27m)에 해당하는 세 가지로 하였다. 또한, 선체 측면 가까이에 벽이 존재하는 경우 침하의 정도가 어떻게 변화하는가에 대해 알아보기 위하여, 흘수의 120%에 해당하는 수심에서는 벽이 존재할 경우 또한 계산하였다. 벽면의 위치는 파나마 운하의 갑문 반쪽에 해당하는 깊이(16.765m)를 사용하였다.

제한수로의 영향으로 인해 선측 파형 분포가 변화할 것을 예상할 수 있는데, 이를 고려하기 위해서는 자유 수면을 포함하여 계산해야 한다. 자유 수면을 고려하기 위해서는 VOF (Volume of Fluid) 법과 Level-set 법 등이 사용되고 있는데, 본 연구에서는 상용 전산유체역학 코드에서 지원하는 VOF 법을 이용하여 점성 유동해석을 실시하였다. VOF 법은 수치격자(Numerical grid) 내 물과 공기가 차지하는 유체 체적(Volume of fluid) 비율을 통해 두 유체의 경계면인 자유수면의 위치와 움직임을 추적하는 기법으로(Park, et al., 2005), 전체 저항을 점성저항과 조파저항으로 분리하여 별도로 고려할 필요 없이 한꺼번에 계산할 수 있다는 점에서 최근 각광을 받고 있다(Kim & Hyun, 2008).

2. 지배방정식 및 수치해석 기법

선체 주위의 난류유동 해석을 위한 지배방정식은 비압축성 연속 방정식과 RANS equation(Reynolds-Averaged Navier-

Stokes equation)으로 나타낼 수 있으며, 각각 식 (1)과 (2)에 해당한다(Myong, 2002).

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \tag{2}$$

\bar{U}_i , \bar{P} 등은 모두 시간 평균화된 항이며 아래 첨자는 텐서 (Tensor) 표시법을 뜻한다.

Navier-Stokes 방정식을 시간 평균화 작업을 하면 새로운 항인 $-\overline{\rho u_i u_j}$ 가 생기는데, 이 항은 레이놀즈 응력(Reynolds stress)이라 불리며, 물리적으로 난류에 의해 발생하는 응력이므로 일반적으로 분자 점성에 의해 발생하는 전단응력과 함께 나타내고 있다. 3차원의 경우 레이놀즈 응력을 구체적으로 쓰면 다음과 같이 된다.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u_1^2} & \overline{u_1 u_2} & \overline{u_1 u_3} \\ \overline{u_2 u_1} & \overline{u_2^2} & \overline{u_2 u_3} \\ \overline{u_3 u_1} & \overline{u_3 u_2} & \overline{u_3^2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

위의 레이놀즈 응력에 관한 항인 $\overline{u_i u_j}$ 의 수송방정식을 유도 하게 되면 속도변동의 2차 상관량인 $\overline{u_i u_j}$ 를 구하기 위해 산출 한 식이 더욱 고차의 상관량 및 압력과 속도 변동량과의 상관 등을 포함하고 있다. 이 같은 문제를 닫힘 문제라고 한다.

난류모델은 이 같은 방정식계를 닫기 위해 사용되는데, 본 연구에서 사용된 난류모델인 Realizable k-ε 모델의 경우 레이놀즈 응력의 크기를 평균속도의 변형률(속도구배)에 비례한다고 가정한 Boussinesq의 모델을 사용한 것으로 Boussinesq 모델은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{4}$$

여기서 μ_t 는 난류점성계수(Turbulent eddy viscosity) 또는 와점성계수라고 한다. k 는 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy)이고 δ_{ij} 는 Kronecker's delta로 각각 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}), \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ 1 & (i = j) \end{cases} \tag{5}$$

RANS 방정식의 해를 구하기 위해 유한 체적법(Finite volume method) 기반 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하였고, 난류 모형은 Realizable k-ε model을 사용하였다. 운동방정식의 대류항에 대해서는 2차 풍상차분법(Upwind differencing scheme)을 사용하였고, 확산항에 대해서는 중앙차분법(Central differencing scheme)을 사용하였다. 압력 구배 항은 Body force weighted 방법을, Volume Fraction은 HRIC 방법을 사용하였다. 속도-압력 연성은 SIMPLEC 방법을 선택하였다. 또한, 시간 적분에 대해서는 1차 정도의 Implicit 방법을 사용하였다. 한편, 계산의 효율성과 수렴성 및 안정성을 위해 난류 경계층 이론에서 잘 알려지고 현재 가장 많이 쓰이는 벽법칙인 Launder and Spalding's wall function을 적용하였다(Hirsch, 2007; Shin & Jung, 2010).

한편, 이번 연구에서의 수치해석 방법의 자체적인 검증을 위하여 고차의 수치해석 방법을 한 가지 경우에 대해서 실시하였는데, 이때에는 대류항에 대해서 3차의 정도를 지나는 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) 방법을, 시간 적분에 대해서는 2차 정도의 Implicit 방법을 사용하였다.

3. 대상 선형의 제원 및 격자생성

3.1 모형선 제원

본 연구에서 계산을 위해 사용한 선형은 KCS로, 1/31.5994의 축척을 사용하였으며, 이는 유사한 연구를 수행한 논문과 그 결과를 비교하기 위함이다. 모형선의 자세한 제원은 Table 1에 나타냈으며, 수치계산을 위한 기본 좌표계로는 유체가 유입하는 방향을 +x, 우현을 +y, 그리고 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 +z로 하는 직교좌표계를 사용하였고, 좌표계의 원점은 선체 중심면(Center plane)과 중앙면(Midship), 그리고 정수면(Calm free surface)이 만나는 점에 위치시켰다.

Table 1 Principal dimensions of KRISO 3600TEU container ship(KCS)

	Prototype	Model 1
Scale ratio	1	31,5994
Lpp(m)	230,00	7,2786
B(m)	32,200	1,0190
T(m)	10,800	0,3418
S(m ²)	9530,0	9,5441
Speed(m/s)	12,346(24,0kts)	2,1960
C _B	0,6505	

3.2 격자 생성

선체 표면의 형상은 공개되어 있는 IGES 파일을 사용하였으며, 선체 표면 및 유체영역 격자 생성은 타와 프로펠러를 제외한 선체만을 대상으로 상용 격자 생성 프로그램인 Gambit 2.4를 이용하여 수행하였다.

Fig. 1은 선체 표면 격자의 형상을 나타내고, Fig. 2~3은 수심 12.96m 조건에서 선수 선미부분 격자 형상을 나타낸다. Fig. 4에서 선체 표면에 분포된 y+값을 확인할 수 있으며, 가장 큰 값이 160을 넘지 않고 있다. 초기에 y+100을 예상하고 격자를 생성하였지만 선미 벌브 부근에서 격자를 매끄럽게 하는 작업을 진행하는 과정에서 예상보다는 조금 큰 값이 나왔다. y+값이 계산속도 조건에 따라서 모두 다르게 나왔지만, 모두 이 값보다 작은 값을 얻을 수 있었다. FLUENT 사용자 설명서를 보면 y+를 350 이하의 값으로 사용할 것을 권장하고 있으며, 모두 만족함을 확인하였다.

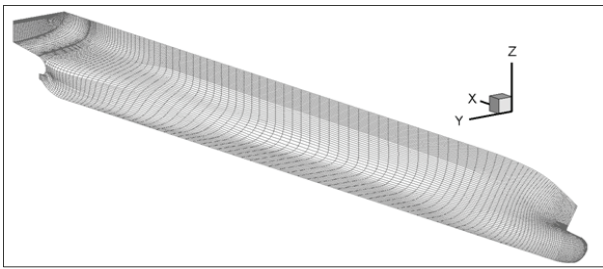


Fig. 1 Configuration of hull surface mesh

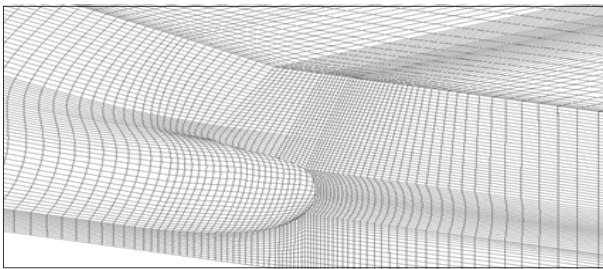


Fig. 2 Close view of grid system near bow

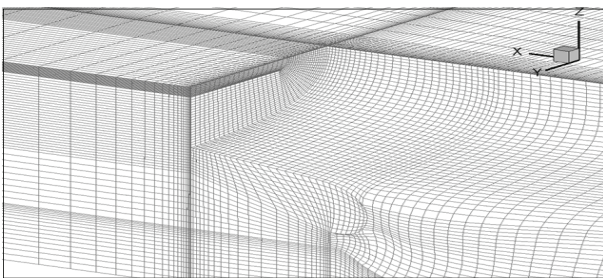


Fig. 3 Close view of grid system near stern

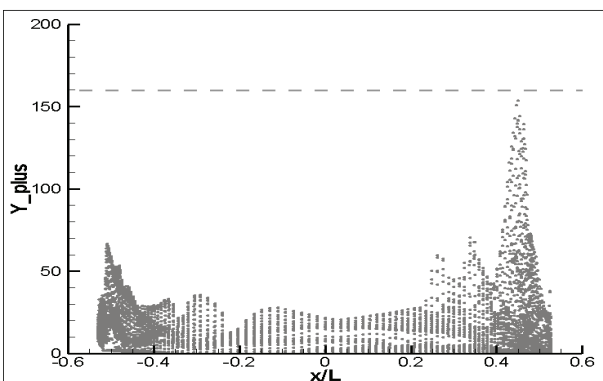


Fig. 4 y+ distribution along the hull surface

Table 2에 전체 격자수를 나타내었으며, 천수 조건으로 유체 영역의 크기가 굉장히 줄어들었기 때문에 전체 격자수도 심수에서의 저항계산과 같은 경우에 비해 상당히 적어지는 것을 볼 수 있다. 계산에 사용된 격자의 종류는 Table 2에 나타낸 것과 같이 총 5가지이며, 수심 12.96m 조건에서 한 가지 경우에서만 더욱 세밀한 격자를 이용하여 계산함으로써(Case 3) 본 수치 계산의 정확도를 자체적으로 검증하였다. 세밀한 격자는 등성간 격자에서 각 길이방향으로 $\sqrt{2}$ 배 많은 격자를 분포함으로써 생성하였다.

Table 2 The number of total grid points

Case	Condition	Number of total grid points
Case 1	H=12.96m w/ wall	273,616
Case 2	H=12.96m w/o wall (Coarse mesh)	541,296
Case 3	H=12.96m w/o wall (Fine mesh)	1,511,776
Case 4	H=16.2m w/o wall	648,368
Case 5	H=27.0m w/o wall	728,672

3.3 유체영역 및 경계조건

벽면이 존재하는 Case 1을 제외한 유체영역은 Fig. 5와 같으며, 깊이의 경우 앞서 언급한 바와 같이 흡수의 120%(12.96m), 150%(16.2m), 그리고 250%(27m)에 해당하는 값을 이용하였다. 벽이 존재하는 Case 1의 경우, 벽의 위치를 파나마 운하 갑문의 반폭인 16,765m로 모델링하였다.

Table 3에는 부여된 경계조건을 나타내었다. 바닥 경계 조건과 같이, 선체 근방에 있는 벽 경계의 경우 각 계산 조건에 맞추어 계산 속도로 이동하는 벽 경계조건을 부여하였다.

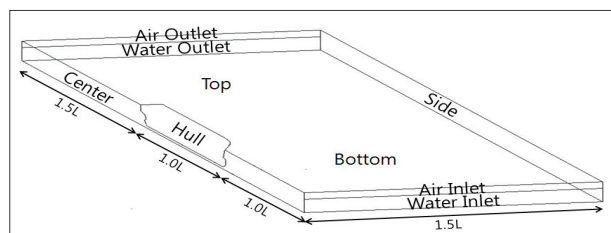


Fig. 5 Description of fluid domain

Table 3 Boundary conditions

Boundary	Case 1	Case 2~5
Hull	No slip wall	
Air inlet	Pressure inlet	
Air outlet	Pressure outlet	
Water inlet	Pressure inlet	
Water outlet	Pressure outlet	
Top	Symmetry	
Bottom	Moving wall	
Center	Symmetry	
Side	Moving wall	Slip wall

4. 수치해석 결과

4.1 수직방향 힘

Fig. 6에서는 각 계산 조건에서의 수직방향 힘을 타 논문에서의 결과와 비교하였다(Jachowski, 2008). 실선은 본 연구에서 계산한 결과 값을 나타내고 점선은 Jachowski의 계산 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 각 계산 조건에서의 실선 속도를 나타내고, 세로축은 각 계산 조건에서의 수직방향 힘 감소량을 나타내며 이는 부력의 변화량을 의미한다. 속도가 0일 때에는 그 값을 0으로 하였다.

Case 1은 앞에서 설명한 것과 같이 선체 측면에 벽이 존재할 경우이며, 이 경우 수직방향 부력의 감소가 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 벽이 존재하는 제한수로의 경우 선박 침하의 정도가 더욱 큰 것으로 알려져 있다(Barrass & Derrett, 2006). 이는 측면에도 경계가 있음으로 인하여 선저부근 속도의 증가가 더욱 크게 나타나면서 압력 강하가 더욱 크게 발생하면서 나타나는 현상으로 판단할 수 있다.

본 연구의 계산 결과를 자체적으로 검증하기 위해 한 가지 경우(수심 12.96m, 속도 13.4노트)에 대해 좀 더 세밀한 격자와 높은 정도의 수치해석 방법을 사용하여 계산했으며, 계산 결과의 차이가 모두 0.1% 이내로 격자수가 상대적으로 적은(541,296개) 경우에도 정확도 높은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 한편, Jachowski의 계산 결과와 비교해보면 본 연구에서의 결과가 조금 작은 값으로 추정을 하고 있다. Jachowski의 논문에서는 본 연구에서 사용한 격자수보다 많은 약 70만개의 격자를 사용하였으나, 흡수선 위로 상당히 높은 곳까지 격자를 생성함으로써 실제로 계산 결과에 영향을 미치는 격자수가 꽤 적을 것으로 생각되며, 수치해석 기법에 따른 차이가 발생할 수 있을 것이라 예상하지만 Jachowski의 논문에 수치해석 기법이 기술되어 있지 않았기 때문에 정확한 비교가 불가하다.

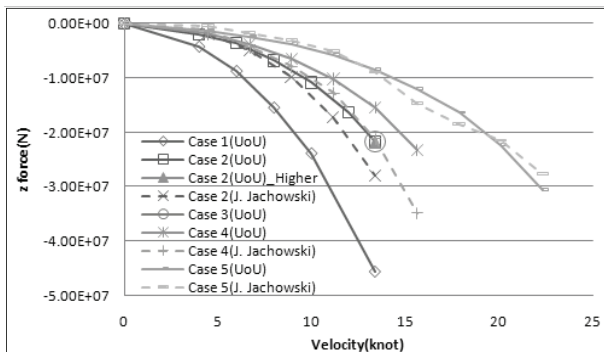


Fig. 6 Comparison of z force

4.2 스쿼트

수직방향 힘 계산 결과를 이용하여 각 계산 조건에서의 선박 침하 정도를 여러 경험식과 함께 비교하였고, 경험식은 식 (6)~(11)과 같다(Hewlett, et al., 2002).

$$\text{Barrass 2 : } \delta_{\max} = \frac{C_b S^{0.81} V_k^{2.08}}{20} \quad (6)$$

δ_{\max} : Ship squat(m), C_b : Block coeff.

V_k : Ship speed(knots)

$S = A_s/A_c$: Channel blockage

A_s : Ship underwater cross-sectional area

A_c : Cross-sectional channel area

$$\text{Barrass 3 : } \delta_{\max} = \frac{C_b V_k^2}{100} \text{ for open water} \quad (7)$$

$$\delta_{\max} = \frac{C_b V_k^2}{50} \text{ for confined channels}$$

$$\text{Tuck/Huuska : } \delta_{\max} = 2.4 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1-F_{nh}^2}} K_s \quad (8)$$

∇ : Volumetric displacement(m^3)

L_{pp} : Length btw perpendiculars(m)

$F_{nh} = V/\sqrt{gh}$, V : Ship speed(m/s)

h : Water depth(m), g : Gravitational accel.

$K_s = 7.45S + 0.76$ when $S > 0.03$, or $K_s = 1$ when $S \leq 0.03$

$$\text{Tuck : } \delta_{\max} = 1.46 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1-F_{nh}^2}} K_s \quad (9)$$

$$+ 0.5 L_{pp} \sin \left(\frac{\nabla}{L_{pp}^3} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1-F_{nh}^2}} K_s \right)$$

$$\text{Eryuzlu et al : } \delta_{\max} = 0.298 \frac{h^2}{T} F_{nh}^{2.289} \left(\frac{h}{T} \right)^{-2.972} K_b \quad (10)$$

T : Ship draft, B : Ship beam

$K_b = \frac{3.1}{\sqrt{W/B}}$ when $\frac{W}{B} < 9.61$ or $K_b = 1$ when $\frac{W}{B} \geq 9.61$

W : Channel width

$$\text{Eryuzlu and Hausser : } \delta_{\max} = 0.113 \left(\frac{T}{h} \right)^{0.27} B F_{nh}^{1.8} \quad (11)$$

Fig. 7에서는 Case 1(수심 12.96m, 벽이 존재하는 경우)에서의 선박 침하 정도를 각 계산 속도에서 경험식과의 비교를 한 것이고, 벽에 의한 효과를 비교하기 위하여 같은 수심에서 벽이 존재하지 않는 Case 2의 결과와 함께 나타내었다. Case 1과 Case 2의 결과를 비교해 보면, 역시 선체 측면 가까이 벽이 존재할 경우(Case 1) 침하가 더욱 크게 일어나는 것을 볼 수 있다.

경험식에서 얻어지는 침하 값과는 다소 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 이번 연구 결과에서는 선수, 선미 트림에 의한 침하는 고려되지 않았기 때문에 이 같은 결과가 얻어진 것으로 판단된다. 트림에 대해서는 뒤에 더욱 자세히 설명할 것이다. Barrass 2, Barrass 3, Tuck/Huuska의 경험식에 의하면 8노트 이상의 속도로 운항할 시 침하에 의하여 선박이 좌초될 수 있기 때문에 이보다 더욱 낮은 속도에서의 운항이 필요하다.

Fig. 8에서는 Case 2(수심 12.96m)에서의 선박 침하 정도를 비교한 것이다. Jachowski의 침하 계산 결과와는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있으며 Eryuzlu, et al. (1994 cited in Hewlett, et al., 2002)과 Tuck의 경험식으로부터 얻어진 결과와 가장 근접한 결과를 얻었다. 수심 12.96m의 경우 선저아래 여유 깊이가 2.16m로 그 값이 굉장히 작다. 선박이 운항하게 되면 선박의 자세 변화로 인하여 트림이 발생할 수 있기 때문에 이 같은 경우 트림에 의한 좌초가 발생할 수 있다. 1도의 선수 혹은 선미 트림이 발생할 시 선수 또는 선미에서 약 2m의 추가적인 침하가 발생하기 때문에 굉장히 낮은 속도에서의 운항이 필수적이다. 실제로 파나마 운하를 통과하는 모든 선박은 운항 속도를 6노트로 제한하고 있다.

Fig. 9와 10은 각각 Case 4와 5 조건에서 각 속도에서의 선박 침하를 계산한 결과이다. Fig. 9에서 Eryuzlu, et al. (1994 cited in Hewlett, et al., 2002)의 경험식으로부터 얻어진 결과와 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다. Hewlett, et al. (2002)에서는 실선을 이용한 침하 해석을 수행하였으며, Eryuzlu, et al. (1994 cited in Hewlett, et al., 2002)의 경험식을 사용할 것을 추천하고 있다. 수심이 깊어질수록 같은 속도에서의 침하 정도가 많이 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 경험식 별로 침하에 대한 예측 결과가 상당히 많이 다르다는 것을 볼 수 있어 향후 동적 격자(Dynamic mesh)를 이용하거나 모형시험을 통해 경험식 자체를 검증하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 7~10을 살펴보면 Case 5의 Eryuzlu, et al. (1994 cited in Hewlett, et al., 2002)의 경험식(Fig. 10)을 제외한 계산된 모든 결과에서 경험식의 결과보다 다소 작은 값을 얻을 수 있었는데, 이는 본 연구에서는 선박의 자세변화를 고려하지 않아 선수와 선미 트림에 의한 추가적인 선박 침하를 반영하지 못했기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 경험식의 경우, 실선 운항으로 얻어진 것이므로 트림에 의한 추가적인 선박 침하가 고려된 것이라 할 수 있다. 향후, 동적 격자를 이용한 계산이나 선박의 자세 변화에 따른 격자 재생성 등의 방법을 사용하면 경험식의 결과에 좀 더 근접할 수 있을 것이라 사료된다.

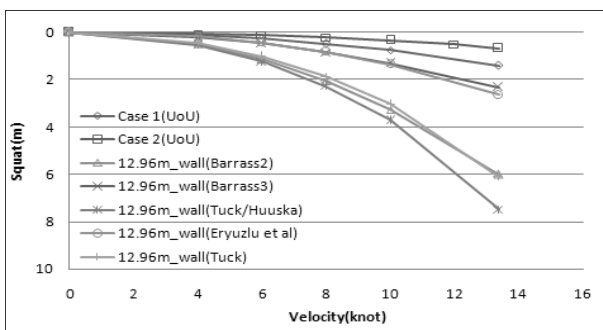


Fig. 7 Comparison of squat(Case 1 and 2)

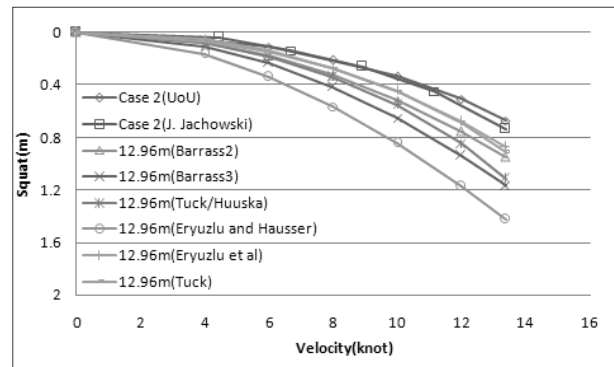


Fig. 8 Comparison of squat(Case 2)

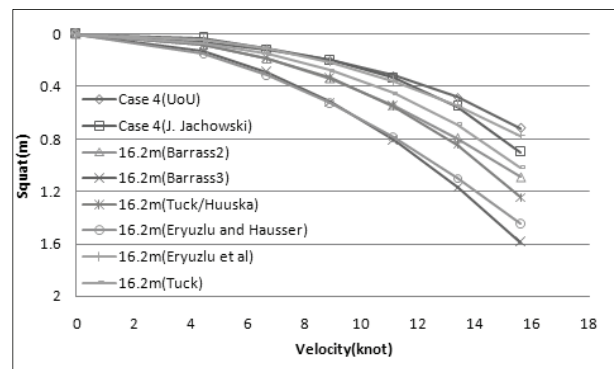


Fig. 9 Comparison of squat(Case 4)

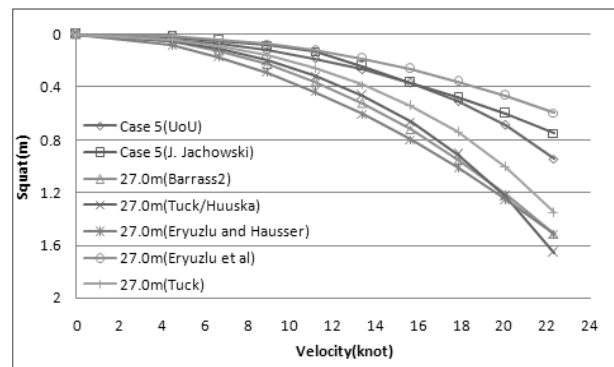


Fig. 10 Comparison of squat(Case 5)

4.3 선체 주위 파형

선박이 제한수로에서 임계속도로 항진할 경우 솔리톤(Soliton)이라는 특이한 파가 발생하게 되며(Choi, 1989), 이 같은 특성 때문에 제한수로에서는 선체 측면 파형 분포를 비교할 필요가 있다.

Fig. 11~14에서는 각각 Case 1(수심 12.96m, 벽이 존재하는 경우), Case 2(수심 12.96m, 벽이 존재하지 않는 경우), Case 3(수심 16.2m), Case 4(수심 27.0m)에 대하여 각 속도별 선측 파형 분포를 나타내었다. Case 1의 경우 선체 측면 가까이 존재하는 벽의 효과에 의해 선측 파가 굉장히 크게 일어나게 되어 가로축과 세로축의 범위를 다른 경우들과 동일하게 하지 못하여 우측 상단에 범위가 같은 경우를 작게 표시하였다.

선체 측면에 벽이 존재할 경우 그 영향이 두드러지게 나타났다. 선박이 항진함에 따라 선수부에 파가 생성되게 되고 이 같은 파가 측면에 벽이 존재함으로써 빠져나갈 곳이 더욱 협소해지면서 더욱 높게 나타나는 것으로 판단할 수 있으며, 선체 중앙부에 파의 최저점이 피크 형태로 나타났다. 한편, 선미부의 경우 파의 높이가 0에 가까워 상대적으로 선수부의 부력 증가량이 클 것으로 예상할 수 있으며 앞에서 설명한 바와 같이 트림으로 인한 선박 침하가 추가적으로 발생할 것으로 예상된다.

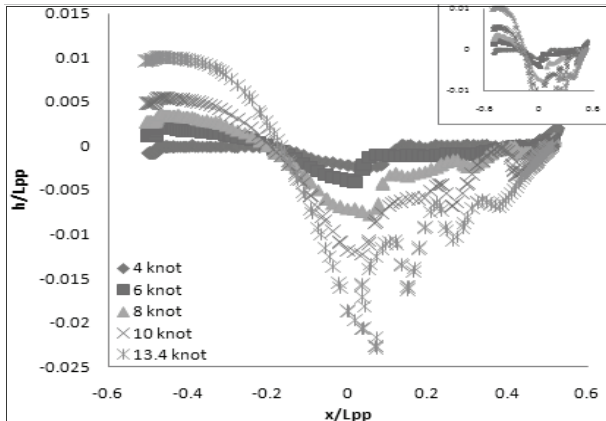


Fig. 11 Comparison of wave profile(Case 1)

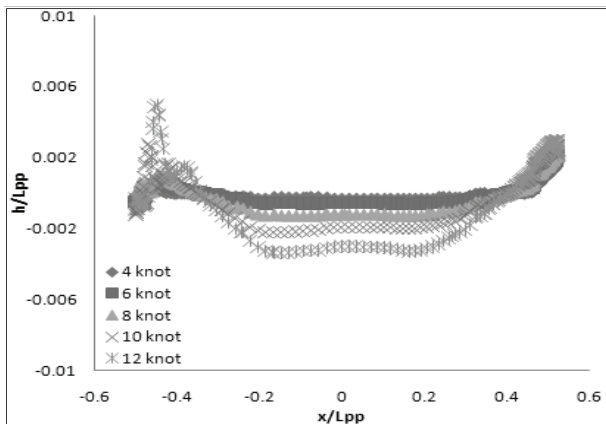


Fig. 12 Comparison of wave profile(Case 2)

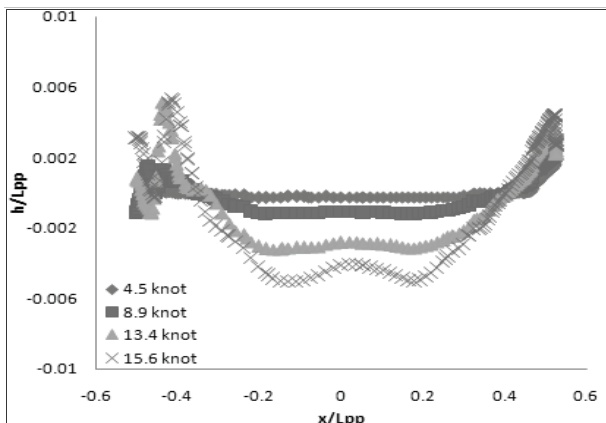


Fig. 13 Comparison of wave profile(Case 3)

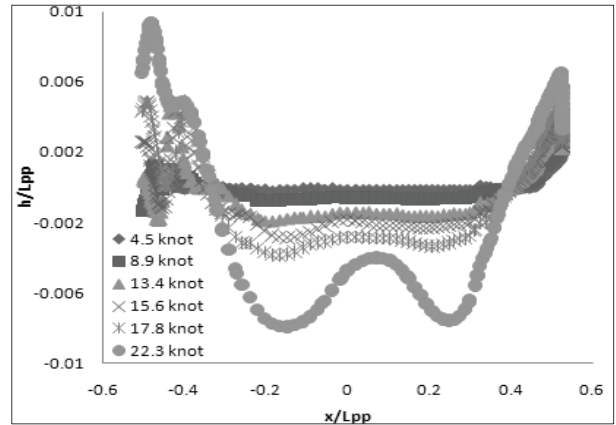


Fig. 14 Comparison of wave profile(Case 4)

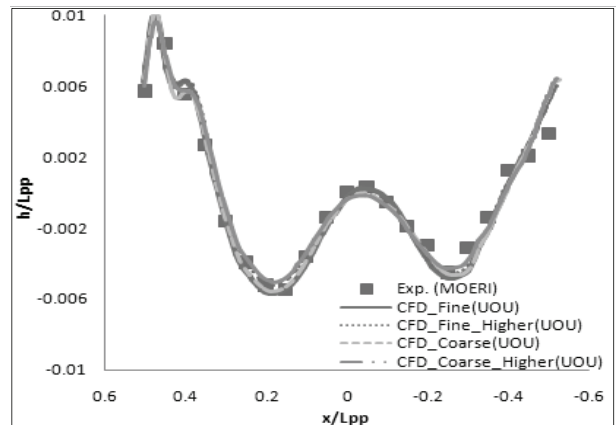


Fig. 15 Wave profile at deep water condition

선체 측면에 벽이 없는 경우에는 선수부와 선미부에 파의 최고점이 비슷하게 나타났으며 파의 최저점의 경우는 피크 형태가 아니라 선체 중앙부를 중심으로 앞뒤로 길게 뻗은 형태로 나타났다. 수심이 얕아질수록 낮은 속도에서도 파고의 크기가 더욱 크게 나타났으며, 수심 27m에서 가장 빠른 속도인 22.3노트의 경우 심수에서의 파 형태와 굉장히 유사하게 나타났다. Fig. 15에는 심수에서의 선측 파형을 실험을 통해 계측한 결과와 계산을 통해 얻은 결과를 비교한 것을 나타내고 이때의 속도는 설계속도인 24노트이다(Van, et al., 2000; Choi & Shin, 2010).

4.4 선체 중앙 축 방향 속도 분포

Fig. 16과 17은 Case 1(수심 12.96m, 측벽이 존재하는 경우)과 Case 2(수심 12.96m, 측벽이 존재하지 않는 경우)에서 각 속도별 선체 중앙부에서의 축 방향 속도 분포를 나타낸 그래프이다. 각 속도는 설계속도인 24노트로 무차원화 한 값이며 각각 4노트, 6노트, 10노트의 계산 결과를 차례로 나타내었다. Case 1과 Case 2 모두 속도가 증가할수록 선저부에서의 속도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해서 선박 침하가 발생할 것을 예상할 수 있다. 선측 가까이 벽이 존재할 경우 선저부의 속도 증가가 더욱 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

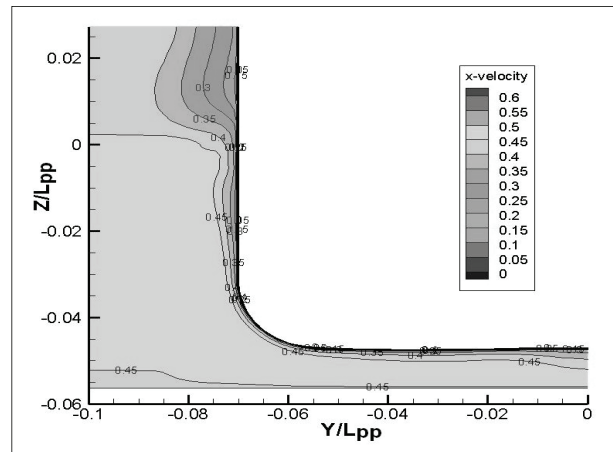
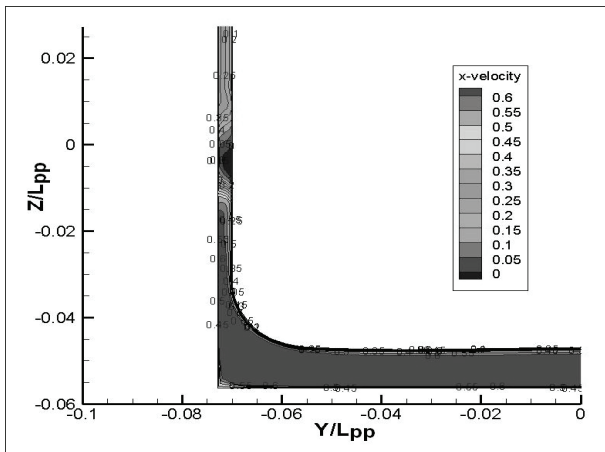
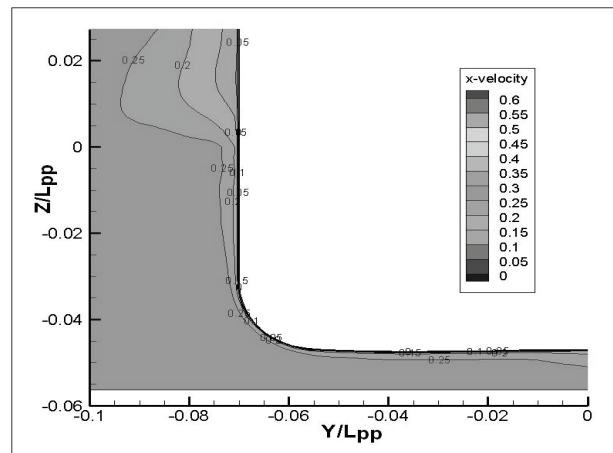
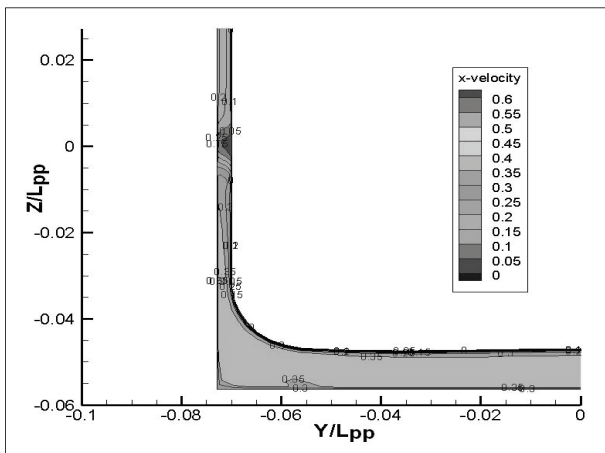
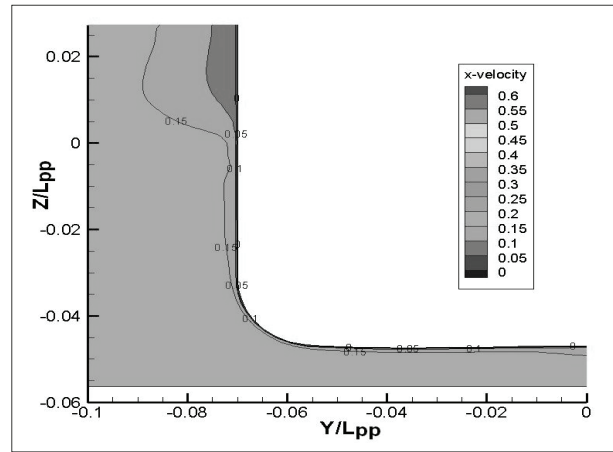
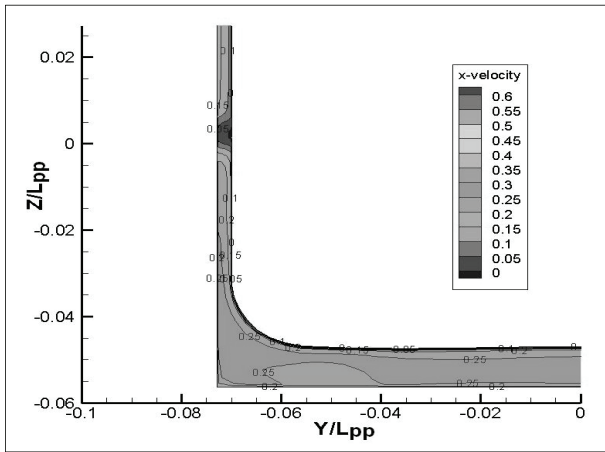


Fig. 16 Comparison of axial velocity contours at midship (4knot, 6knot, 10knot at Case 1)

Fig. 17 Comparison of axial velocity contours at midship (4knot, 6knot, 10knot at Case 2)

5. 결론

본 논문에서는 선박 침하 추정을 위하여 상용 전산유체역학 코드를 이용하여 점성 유동해석을 실시하였다. 침하 현상을 정확하게 묘사하기 위해서는 자유 수면을 포함하여 계산해야 하며, 이를 위해 VOF 법을 이용하였다.

선박 운항 속도가 증가할수록 선체에 작용하는 부력의 감소가 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있었으며, 계산 결과를 타 논문에서의 결과와 비교하였다.

선체 측면 가까이 벽이 존재하는 경우에서의 수직방향 힘 부력의 감소는 벽이 존재하지 않는 경우에서보다 크게 나타났으며, 이는 측면의 영향으로 선저부에서의 속도 증가가 더욱 크게 일어나기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 선박 침하를 계산하여

여러 경험식들과 비교하였으며, 수심이 얕아질수록, 측벽이 존재할 경우 침하의 정도가 크게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 측벽이 존재하는 경우는 경험식과 다소 차이가 나는 것을 확인하였으며, 이는 침하 계산 과정에서 트림의 영향이 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단할 수 있고 향후 트림의 영향을 고려한다면 좀 더 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

선체 측면 파형 분포 비교를 통해 개방된 천수에서와 벽이 존재하는 제한수로에서 선측 파형 형태의 차이를 확인할 수 있었다. 벽이 존재하는 경우 선체 중앙부 부근에서 최저파고가 피크 형태로 나타났으며, 선수와 선미의 파고 차이가 심해 트림에 의한 추가적인 침하가 발생할 것으로 예상할 수 있다. 벽이 존재하지 않을 경우 선수와 선미의 파고가 거의 비슷한 값을 나타냈고 최저 파고가 선체 중앙부를 중심으로 앞뒤로 길게 이어지는 형태를 보였으며, 수심이 얕아질수록 파고가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로 선체 중앙부에서의 축 방향 속도 분포 비교를 통해 선저 부근에서 속도의 증가가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인하여, 선저 부근에서 압력 강하가 발생함을 유추할 수 있다.

추후, 동적 격자(Dynamic mesh)를 이용한 계산을 통해 제한수로에서의 선박 거동을 직접 확인하는 시도를 할 것이고, 시도와 수치 계산의 정확도를 확인하기 위한 모형시험이 필요하다고 사료된다. 한편, Jachowski의 논문과의 좀 더 정확한 비교를 위하여 향후, 비슷한 조건의 격자를 생성하여 계산하는 과정이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

Barrass, C.B. & Derrett, D.R., 2006. Ship Stability for Masters and Mates 6th edition, *Butterworth-Heinemann*.
 Choi, H.S., 1989. A Nonlinear Theory for Wave Resistance and Squat of a Slender Ship Advancing Near the Critical Speed in Restricted Water, *Journal of the SNAK*, 26(4), pp.3-13.
 Choi, S.H. & Shin, H.K., 2010. Calculation of Resistance and Flow Field around KCS Using CFD, *Proceeding of 2010 KAOST*, Jeju, 3-4 June 2010, pp.2542-2544.

Hewlett, C. Daggett, L. Stocks, D. & Vladimir, A., 2002. Dynamic Squat and Under-Keel Clearance of Ships in Confined Channels, *30th International Navigation Congress*, S10B, pp.152-163.
 Hirsch, C., 2007. Numerical Computation of Internal & External Flows 2nd edition, *Butterworth-Heinemann*.
 Jachowski, J., 2008. Assessment of ship squat in shallow water using CFD, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(1), pp.27-36.
 Kim, T.Y. & Hyun, B.S., 2008. Analysis of Flow Field Including Bodies Steadily Moving Around the Free-surface by FLUENT-VOF Method, *Journal of Navigation and Port Research*, 32(1), pp.9-14.
 Myong, H.K., 2002. Computational Heat Transfer and Fluid Flow, <http://Munundang.co.kr>
 Park, I.R. Kim, W.J. Kim, J. & Van, S.H., 2005. A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing, *Journal of SNAK*, 42(2), pp.88-97.
 Shin, H.K. & Jung, J.H., 2010. Circular Motion Test Simulation of KVLCC1 Using CFD, *Journal of SNAK*, 47(3), pp.377-387.
 Transportation Safety Board of Canada, 2008. Marine Reports - 2000 - M00L0039, <http://www.tsb.gc.ca/eng/rappports-reports/marine/2000/m00l0039/m00l0039.asp>
 Van, S.H. Kim, W.J. & Kim, D.H., 2000. Experimental Investigation of Local Flow around KRISO 3600TEU Container Ship Model in Towing Tank, *Journal of SNAK*, 37(3), pp.1-10.

