

선박 측면 파공에서의 기름 유출 방지를 위해 설계된 앵커형 봉쇄장치의 유동 해석

김동영¹ · 백광준[†] · 이순현² · 황종하³

(Received January 26, 2019 ; Revised May 8, 2019 ; Accepted May 19, 2019)

Numerical analysis of the performance of anchor-type liquid spill stopper to prevent oil leakage from damaged ships

Dong-Young Kim¹ · Kwang-Jun Paik[†] · Soon-Hyun Lee² · Jong Ha Whang³

요약: 2007년 허베이 스피릿호의 충돌 사고로 발생한 파공을 오랜 시간 방치하여 대량의 원유가 태안 인근 해역으로 유출되었다. 이러한 사고로 인해 유출되는 원유를 효율적으로 막기 위한 기술개발이 오랫동안 지속되고 있다. 최근에는 사고의 대안 중 하나로 봉쇄장치를 개발하고, 이에 대한 실험과 수치적 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 파공 면에서 실제 정수압을 구현하기 위해 실제 실험 방식인 가압식 방법과 높이 차이를 이용한 중력식 방법을 비교하였다. 비교하기 위해 유한체적법을 기초로 한 전산유체역학이 수행되었다. 파공 면의 형상에 따른 유동 변화와 압력변화를 분석하였다. 또한, 파공부를 막기 위한 장치인 앵커에 작용하는 힘을 가압식 방법과 중력식 방법에서 비교하였다.

주제어: 앵커, 전산유체역학, 파공봉쇄장치, 선박 파공

Abstract: In 2007, a large volume of crude oil was spilled following the collision of the VLCC Hebei Spirit near the port of Daesan on the Yellow Sea coast of Taean County, South Korea. Technology to effectively prevent the leakage of crude oil owing to marine accidents has been ongoing for years. Recently, devices such as the anchor type liquid spill stopper have been developed in response to these incidents. Numerous experiments have been conducted to verify the performance of such devices. In this study, an experimental method wherein a water tank is pressurized to satisfy the actual hydrostatic pressure at the puncture site on the hull was compared to an experimental method using gravity to satisfy the hydrostatic pressure. The comparison was performed using computational fluid dynamics based on the finite volume method. The flow characteristics inside the tank for punctures of various shapes and the pressure changes in the cross-sections of the punctures were investigated. Furthermore, the drag forces acting on the anchor were compared between the pressurized water and gravity tank.

Keywords: Anchor, Computational fluid dynamics, Liquid spill stopper, Hull puncture

1. 서론

2007년 유조선 허베이 스피릿호와 해상 크레인이 충돌하여 드럼통 약 5만개 분량의 기름이 바다에 유출되었다. 충돌 시 파공을 오랜 시간 방치하여 해양오염 사고는 더욱 심각해졌다. 이 사고는 국내 최대 해양오염 사고로 여겨지고 태안반도 일대는 특별 재난 구역으로 선포되었다. 이렇게 큰 사고로 이어진 이유는 원유가 유출이 된 후 봉쇄가 완료될 때까지 40시간이 소요되었기 때문이다. 또한 2014년 캡틴 반켈리스 L호와 유류 공급선 G호가 충돌하는 사건

이 생겼다. 사고 발생 2시간 만에 해경 대원들의 지원에 의해 파공이 봉쇄되어서 더 이상의 유출된 기름이 없었고, 이후 오염된 곳에 대한 기름띠 확산 방지에 대해 빠른 방제 작업을 진행하였다. 본 사고가 상대적으로 적은 피해로 마무리될 수 있었던 것은 해경의 파공 봉쇄를 위한 역할이 컸기 때문이며, 이는 많은 장비와 인원을 투입한 결과였다. 현재 해상에서도 여러 가지 이유로 발생한 선박의 파공으로 인해 해상 환경오염 사고와 선박 침몰 등이 계속해서 일어나고 있다. 따라서 이러한 해난 사고에 대해 보다 빠른

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4657-5806>): Associate Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea, E-mail: kwangjun.paik@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7331

¹ M.S Candidate, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, E-mail: rlaehddud25@naver.com, Tel: 032-860-7331

² M.S Candidate, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, E-mail: vori93@naver.com, Tel: 032-860-7331

³ CEO, Marin Safety Meca Co., Ltd., E-mail: msmwk@naver.com, Tel: 070-4044-0133

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.

고 안전한 봉쇄 방법이 필요하다.

J. H. Moon *et al.* [1]은 해양오염 사고를 방지하기 위해 개발된 저압형 파공 봉쇄장치에 대한 실험을 하였다. 이 봉쇄장치는 영구자석을 적용하였다. 크기가 서로 다른 파공에 대해 압력을 변화시켜 봉쇄장치의 변형, 누설 등에 대한 성능 검증을 하였고, 실제 함정에서의 작전속도에 따라서 저압형 파공 봉쇄장치의 분리실험을 하였다. Y. H. Na *et al.* [2]은 파공부를 직접적으로 봉쇄하는 장치인 봉쇄 패드의 성능을 실험적으로 검증하였다. 또한 봉쇄패드가 결합된 외부 투입형 봉쇄 장치를 원격제어를 통해 봉쇄 성능 시험을 수행하였다. M. G. Lee *et al.* [3]은 선박 벽면에서 주행이 가능하고 파공부에 앵커를 삽입할 수 있도록 설계하였고, 로봇의 설계 사양과 개발된 기술에 대해 소개하였다.

앵커형 봉쇄장치의 효율적인 사용을 위해 파공의 형상, 유출되는 압력에 따른 연구가 필요하다. 본 연구에서 목표 유출 압력을 유지시키기 위한 방법에 대해 분석하고, 그 방법을 적용하여 형상이 서로 다른 파공부에 따른 탱크 내부 유동변화, 파공부 단면에서의 압력변화와 앵커에 작용하는 항력에 대한 수치해석을 진행하였다.

2. 수치해석 방법과 모델

본 연구에서는 다상 흐름을 수치 해석하기 위해 상업용 CFD 소프트웨어인 STAR-CCM+12.06이 사용되었다. 유동 다상 유동을 위해 VOF(volume of fluid)법이 사용되었다. VOF법은 섞이지 않는 서로 다른 상 간의 경계면을 모사할 경우 유용하게 사용되며, 유체의 체적분율에 대한 수송방정식을 이용하며 하나의 연속방정식과 운동량방정식을 이용하는 수치해석 기법이다. 난류 모델은 Realizable k-ε 이 고려되었다. 연구에 사용된 수치 모델은 Table 1에 나타내었다.

Table 1: Numerical methods for simulation

Numerical models	Method
Used Tool	STAR-CCM+ ver.12.06
Turbulence model	Realizable k-ε
Time	Implicit Unsteady
Multiphase	Volume of Fluid (VOF)

완전히 발달된 난류 유동으로 가정하고, 파공봉쇄장치 효과를 분석하기 위해 비압축성 3차원 비정상 유동을 물리적 모델로 사용되었다. 연속 방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이 사용되었다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho u_i n_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j n_j dS = \int_S (\tau_{ij} n_i - p n_i) dS + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \quad (2)$$

여기서, u_i 는 속도 텐서이고 b_i 는 체적력 텐서이다. ρ 와 p 는 압력과 밀도이다. τ_{ij} 는 점성과 난류의 유효응력이며 다음과 같이 정의된다.

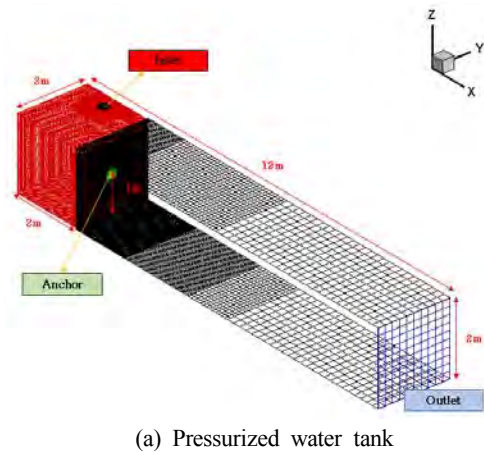
$$\tau_{ij} = \mu_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

여기서, μ_e 는 유체의 동점성계수이다.

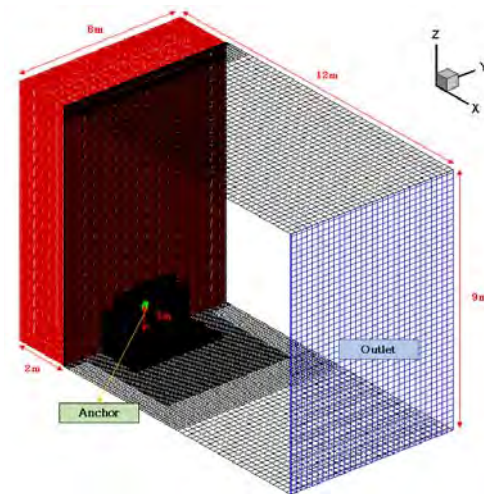
3. 수치해석 조건

3.1 격자계 및 경계 조건

파공이 생겨서 내부의 유체가 유출되는 현상을 모사하기 위해 물 탱크를 모델링 하였고, Figure 1에 나타내었다.



(a) Pressurized water tank



(b) Gravity water tank

Figure 1: Boundary conditions and grid system

물 탱크는 가압식과 중력식으로 총 2가지 조건으로 나누었다. 가압식은 주입구를 두어 물을 일정한 속도로 계속 주입시켜 유출구에서의 목표 압력을 맞추는 방법이고, 중력식은 탱크 내부의 유체의 높이와 파공 부의 중앙까지의 높이 차이를 이용하여 유출구에서의 압력을 맞추는 방법이다. 가압식에서 물의 주입구를 velocity inlet으로 설정하였으며, 출구면은 pressure outlet으로 설정하였다. 나머지 경계 조건들은 wall로 설정하였다. 중력식에서는 따로 물을 주입하지 않기 때문에 inlet은 따로 설정하지 않았다. 출구면은 가압식과 같이 pressure outlet으로 설정하였다. 중력식에서는 수치해석이 진행되는 동안 높이 차이를 유지하기 위해 충분히 넓은 형태의 탱크로 만들어졌다. 격자수는 가압식에서 약 2.5M개, 중력식에서는 약 3.0M개가 사용되었다.

3.2 앵커 형상

앵커의 형상은 Figure 2에 나타내었다. 앵커의 끝은 유출되는 면에 닿게 위치를 설정하였으며 앵커의 중심과 파공 부의 중심을 같게 설정하였다.

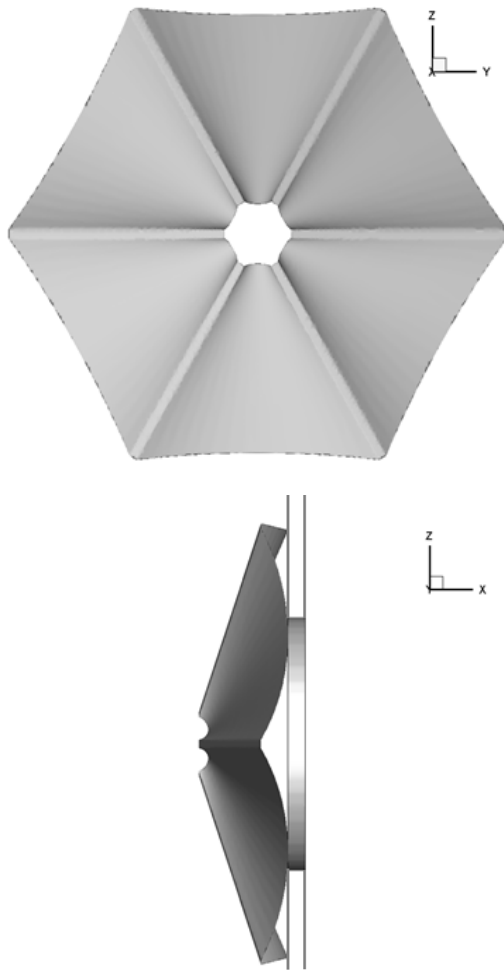
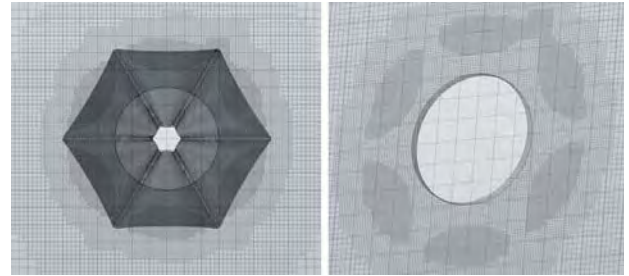


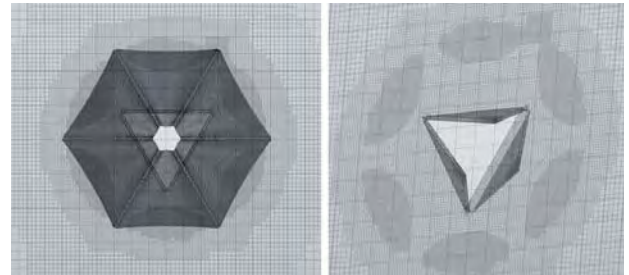
Figure 2: The geometry of anchor

3.3 파공 형상

파공은 원형과 역삼각형으로 2가지를 모델링하였다. 원형 파공은 지름이 30cm이며, 탱크 내부에 부가물이 없는 규칙 파공 형태이다. 역삼각형 파공은 원형 30cm을 외접원으로 가지며 탱크 내부에 부가물이 있는 불규칙 파공 형태이다. Figure 3은 파공들의 격자와 형상을 앵커와 함께 나타내었다.



(a) Circular hole



(b) Inverted triangular hole

Figure 3: Grid structures for anchor and hole

4. 결과 및 고찰

4.1 가압식 방법과 중력식 방법 비교

실제 실험을 할 경우 보통 가압식과 같은 방법을 많이 사용한다. 가압식은 탱크의 주입구에서 수압을 가해 유출 압을 조절할 수 있다. 중력식 방법은 실제 탱크 내부에서 유체의 수면 높이와 파공 부의 높이 차이로 압력을 조절할 수 있다. Figure 4에서 가압식 방법에서 앵커의 유무에 따른 탱크 내부의 압력 분포 비교를 나타내었다. 앵커가 없는 경우, 입구면에서 유체의 주입속도를 조절하여 파공부에서 목표 유출압력인 75kPa을 보였다. 하지만 앵커가 있는 경우, 탱크 내부 전체가 75kPa를 넘는 수치를 보였다. 이는 파공부를 통해 나가는 유체가 앵커에 막혀서 앵커가 없을 경우보다 훨씬 적은 양이 유출되는데, 앵커가 없을 경우와 같은 속도로 유체가 지속적으로 주입되면 내부의 압력이 높아진다. 따라서 실제 실험에서 앵커가 존재하는 경우, 가압식으로 주입구에서 물의 주입량이나 주입속도를 유지시키면 탱크 내부의 압력이 계속 높아질 수 있다.

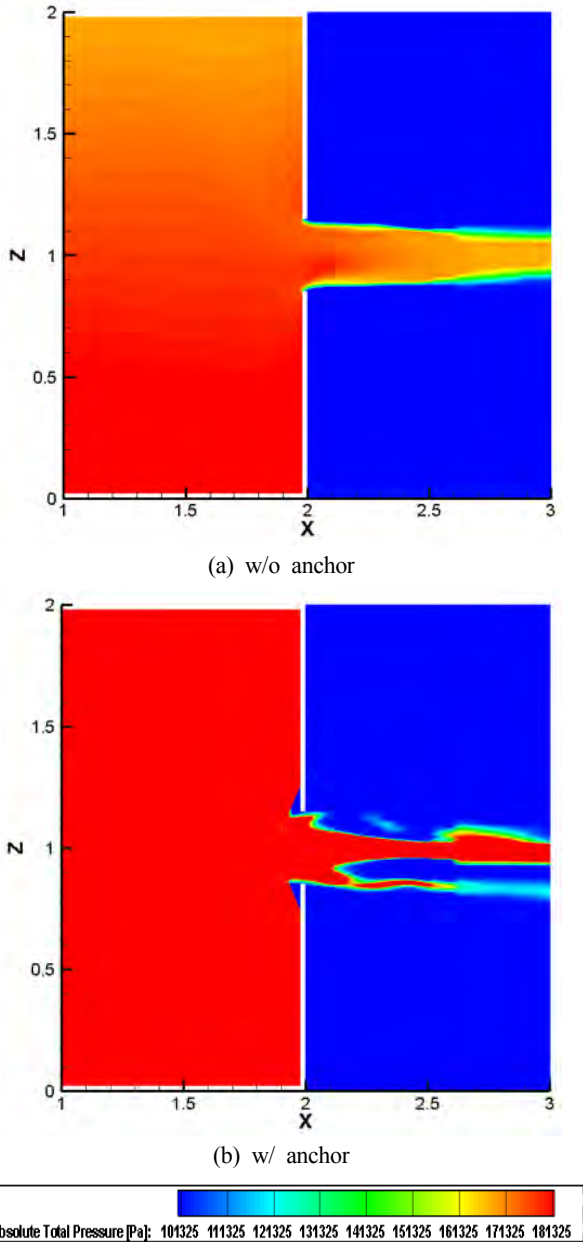


Figure 4: Comparison of pressure distribution between without and with anchor in the pressurized water tank

이를 수치적으로 확인하기 위해 각 지점에서의 속도를 Figure 5로 나타내었다. 각각의 위치는 유체가 담긴 탱크의 두께를 포함하는 지점을 기준으로 시작해서 양 쪽으로 50cm 범위 안에 10cm 간격으로 총 10가지 지점에서의 속도를 나타내었다. 앵커가 없을 경우 내부에서는 속도가 0m/s에 가깝다. 파공부 근처로 갈수록 속도가 높아지면서 그 이후 50cm까지는 속도가 유지된다. 하지만 앵커가 존재할 경우, 내부 속도는 유사하지만 높아진 내부 압력 영향으로 속도는 매우 높게 유출되었다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 높이 차이에 의한 압력을 이용한 방법이 필요하다.

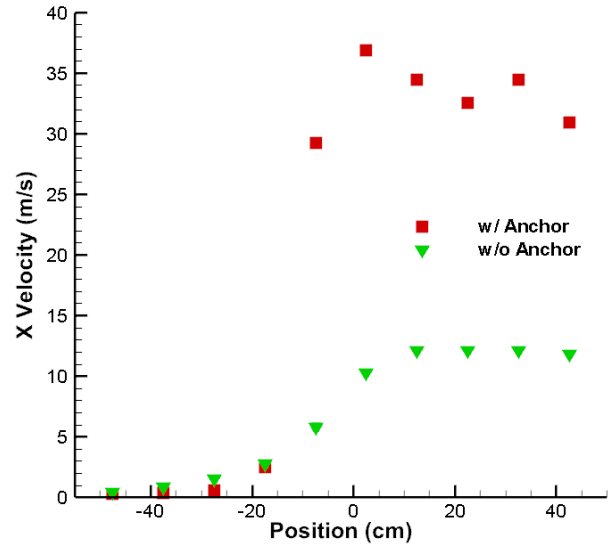


Figure 5: Comparison of velocity distribution near puncture between without and with anchor at circular hole

Figure 6은 중력식 방법을 사용하여 원형 파공부 주위의 압력 분포와 속도 분포를 나타내었다. 앵커가 없을 경우, 가압식과 유사한 압력 분포를 나타내었으며 파공부에서는 목표 유출 압력인 75kPa을 보였다. 앵커가 있는 경우, 가압식과 다르게 탱크 내부의 압력이 상승하지 않음을 확인할 수 있었다. 파공부에서의 압력을 보면 앵커의 존재 유무에 따라 압력차이가 확연하게 나타난다. 앵커가 없는 경우 대부분의 파공부 면적에서 75kPa로 유출된다. 하지만 앵커가 존재하는 경우 중심을 제외하고 약 30kPa로 낮아짐을 알 수 있다. 탱크 내부와 외부의 속도 분포를 보면 앵커가 존재하였을 경우 많이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 탱크 내부에서는 앵커의 존재 유무에 상관없이 파공부로 모이는 유동을 보이지만 앵커가 존재하는 경우에는 유동이 앵커면에 막혀서 실제 파공부에서의 앵커투입 시 유출량이나 유출속도가 줄어드는 현상을 잘 보여준다.

4.2 역삼각형 파공

Figure 7은 중력식 방법을 사용한 역삼각형 모양의 불규칙 파공부 주위의 압력 분포와 속도 분포를 나타내었다. 앵커가 없을 경우에 파공 중심부에서 75kPa을 확인하였다. 원형 파공과 다르게 역삼각형 파공 조건의 경우 탱크 내부에 불규칙한 부가물의 존재로 인해 유체는 부가물을 타고 나가는 형태를 보인다. 즉, 수평방향보다 약간 위쪽으로 향해 나간다. 앵커가 있을 경우 파공부 근처에서의 압력은 원형 파공과 비슷하게 중앙부분에서의 압력이 높고, 압력의 수치 또한 75kPa임을 확인할 수 있다. 파공부 단면을 보면 앵커가 없을 경우 삼각형의 중앙에서 높은 압력을 형성함을 알 수 있다. 앵커가 존재 할 경우 파공부 단면에서는 현저히 낮은 압력으로 유출되는 것을 볼 수 있다. 유동 속도 분

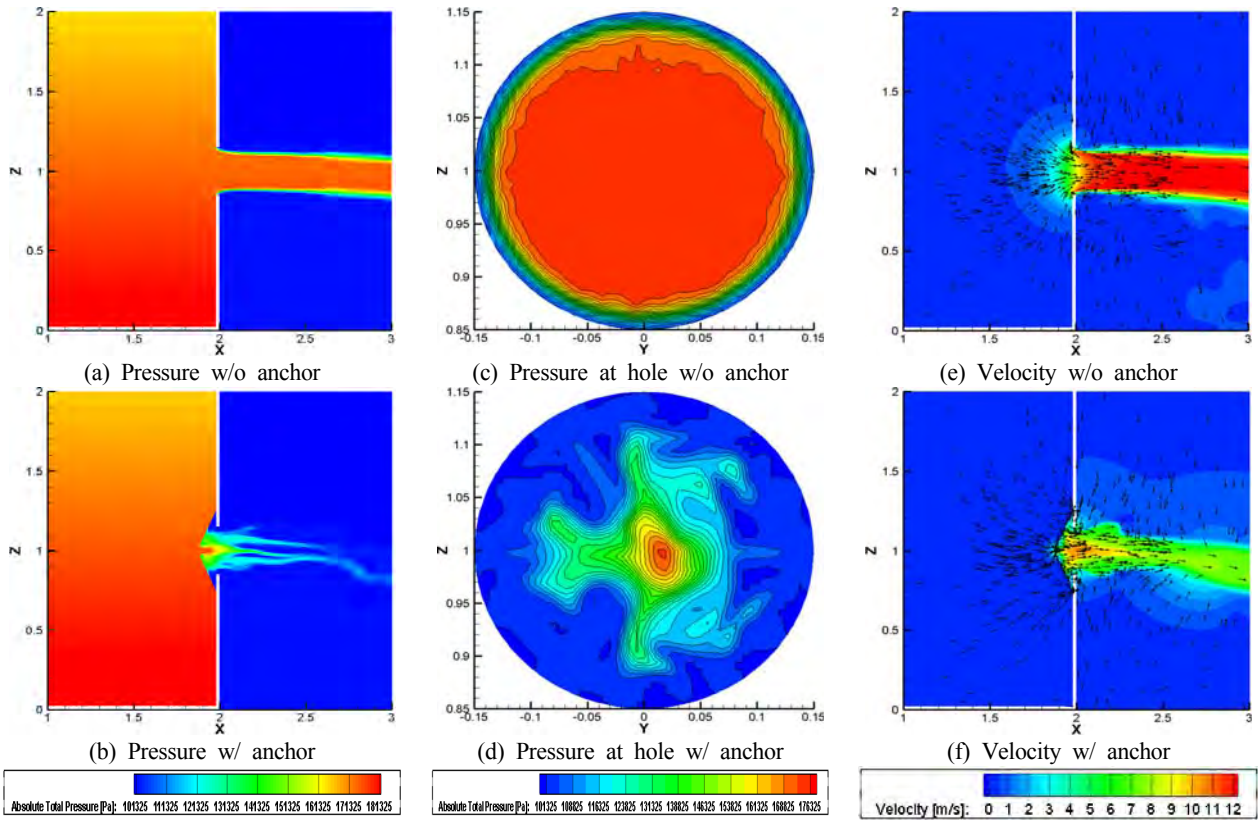


Figure 6: Comparison of pressure and velocity distributions between without and with anchor at the circular hole in the gravity water tank

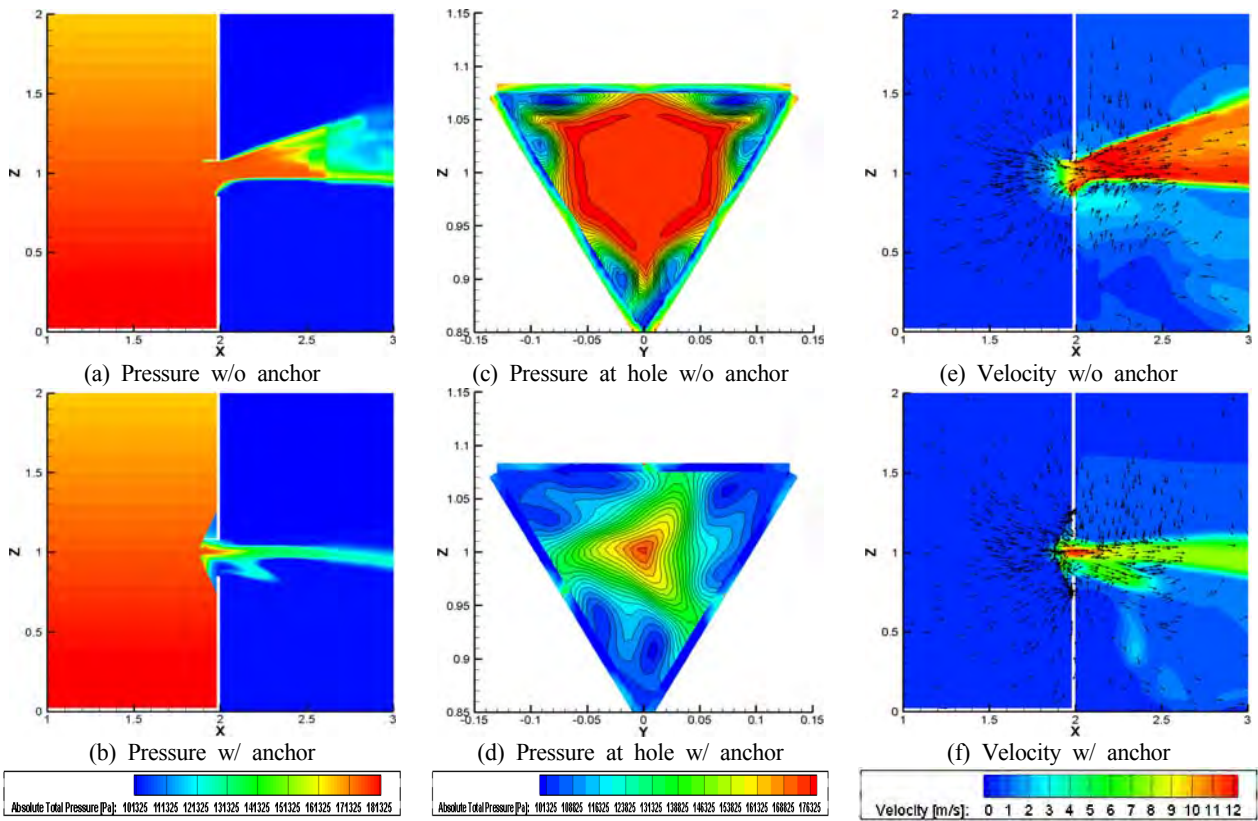


Figure 7: Pressure and velocity distributions in inverted triangular hole using gravity water tank

포를 보면 원형 파공과 마찬가지로 탱크 내에서 파공부로 모이는 유동 형태를 보이고, 앵커가 존재할 때 낮은 속도로 유출됨을 확인하였다.

4.3 앵커에 작용하는 항력

가압식 방법에서의 원형 파공과 중력식 방법에서의 원형 파공과 역삼각형 파공에 따른 앵커에 걸리는 항력을 Table 2에 나타내었다. 가압식 원형 파공의 경우 181,513N이 앵커에 항력으로 작용하였고, 중력식 방법에서 원형 파공의 경우 15,098N의 항력이 작용하였으며, 역삼각형의 경우 13,736N의 항력이 작용하였다. 가압식 방법으로 실험을 진행을 하면 앞서 말한 현상으로 탱크 내부에 압력이 계속 높아지게 된다. 그 결과로 앵커에 항력이 10배 이상이 걸리게 된다.

Table 2: Drag on anchor

Type		Drag [N]
Pressure Tank	Circle	181,513
	Inverted triangle	13,736
Gravity Tank	Circle	15,098
	Inverted triangle	13,736

5. 결 론

본 논문에서는 선박 파공 봉쇄장치 개발의 기초연구로서 봉쇄장치 성능을 검토하기 위해 탱크에서 유출시키는 방법에 대해서 조사하였고, 원형과 역삼각형 파공일 때 탱크 내부와 외부의 압력 변화에 대해서 수치 해석을 진행하였다.

(1) 가압식과 중력식으로 나누어서 수치 해석을 진행한 결과 가압식의 경우, 앵커가 존재할 때 탱크 내부의 압력이 목표 압력 75kPa보다 높아짐을 확인하였다. 이는 실제 파공이 생겼을 경우와 맞지 않는 현상이기 때문에 높이 차이를 이용한 중력식 방법을 제안한다.

(2) 유체의 수면과 파공 중심부의 차이에 따른 압력이 75kPa임 확인하였고, 앵커의 존재할 때 유출되는 압력은 30kPa이며 속도도 현저히 작아짐을 확인하였다.

(3) 역삼각형 파공에서 앵커에 작용하는 항력은 대략 13kN 이고, 원형 파공일 경우 대략 15kN으로 앵커에 항력으로 작용하였다. 역삼각형 파공보다 원형 파공일 경우, 앵커에 작용하는 항력이 더 크게 작용하였다.

후 기

본 논문은 한국산업기술진흥원(KIAT)의 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업(2018년 한-영 해양플랜트 글로벌 전문인력 양성사업, 과제번호 : N0001287)’ 재원 및 해양경찰청(2019년 외부입형 선박파공봉쇄장치개발) 재원으로 지원받아 수행된 연구입니다.

Author Contributions

Simulation, D. Y. Kim and S. H. Lee; Investigation, D. Y. Kim and S. H. Lee; Writing-Original Draft Preparation & Editing, D. Y. Kim and S. H. Lee; Conceptualization, K. J. Paik; Supervision & Writing-Review, K. J. Paik; Funding Acquisition, J. H. Whang.

References

- [1] J. H. Moon, J. K. Kim, K. S. Kwon, K. T. Jung, and J. H. Yun, “An experimental study on the performance of liquid spill stopper to prevent flood through the hull punctures,” Journal of Korean Navigation and Port Research, vol. 37, no. 2, pp. 149-154, 2013 (in Korean).
- [2] Y. H. Na, M. Y. Park, Y. J. Hong, S. C. Jee, J. H. Hwang, and H. C. Lee, “Experimental study on the performance of leak stopping pad of outboard type leak stopping system against the damaged hole in the ship hull,” Proceedings of the Korean Society of Disaster Information Conference, pp. 331-332, 2017 (in Korean).
- [3] M. G. Lee, Y. J. Hong, S. C. Jee, and J. C. Kim, “Design and experiment of leak stopping robot against the damaged hole in the ship hull,” Proceedings of the Korean Society for Marine Environment & Energy Conference, pp. 26-32, 2018 (in Korean).