

부유성 HNS의 근접영역의 확산 특성에 대한 수치해석

고민규* · 정찬호** · 이문진*** · 정정열*** · 이성혁****

* 중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과, ** 중앙대학교 기계공학과, *** 선박해양플랜트연구소, **** 중앙대학교 기계공학부 교수

요 약 : 해양 HNS(Hazardous and Noxious Substances)의 유출 사고 시, 막대한 인명 피해와 환경 훼손을 피하기 위해 유출 사고 조기 예측과 정확한 확산 경로를 예측하는 것이 필수적이다. 본 연구의 최종목적은 전산유체역학을 이용하여 HNS사고가 발생하였을 때 위험구역을 적절히 예측할 수 있는 수치해석기법을 개발하고, 다양한 해양사고조건과 환경영향을 고려하여 근접역에서의 2차원 확산 특성을 고찰하고 확산 현상을 예측하기 위한 모델을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 상용코드인 ANSYS FLUENT(V. 17.2)을 사용하여 근접역에서의 2차원 확산특성을 모사하고 분석하였다. 특히, 누출된 HNS의 위치별 농도를 예측하기 위해 종수송방정식(Species Transport Equation)을 이용하였으며 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식과 표준 k-ε 모델을 이용하여 난류유동을 모사하였다. 해석된 결과는 문헌에서 얻어진 실험데이터와 상호비교하였으며 해수의 유속, HNS의 밀도에 따른 유층 두께, 해수면 HNS 평균 농도 그리고 HNS 전파 속도를 분석하였다. 유층 두께는 해류 유속에 따라 변화하며 변화 경향에 따라 두 구간으로 나눌 수 있다. 해류 전파 속도는 대체로 해류 유속과 선형적 비례관계를 갖는 것으로 나타났다. 해수면 평균 HNS 농도는 해류 유속에 선형적으로 비례하여 감소하며, HNS 밀도가 큰 경우 해수면 평균 HNS 체적 농도는 더 빠르게 감소하게 된다. 이러한 결과는 HNS 확산 특성을 분석하고 관련된 예측모델을 개발하는 데에 기여할 수 있다.

핵심용어 : 위험유해물질, 전산유체역학, 유출특성, VOF 모델

1. 서 론

HNS(hazardous and noxious substances)란 해양환경에 해로운 결과를 미치거나 미칠 우려가 있는 액체 물질과 그 물질이 함유된 혼합 액체물질로 해양환경관리법 규칙 제 3조에 따라 약 545 종이 분류 되어 있다. 대량의 HNS 화물은 저렴한 비용으로 운반하기 위해 항로를 통해 수송되며, 수송량은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다[1]. 항만 혹은 선박에서 HNS 관련 사고가 발생하면 유출 물질의 종류에 따라서 다양한 확산 거동(침강, 부유, 증발, 용해)을 보인다. 또한 HNS의 위험성(생물 축적도, 생분해도, 독성, 폭발성)에 따라 그 피해 경향이 달라지므로 사고 발생 시 유기적인 대처의 난이도가 매우 높아진다[2-3]. 특히 HNS의 특성을 제대로 이해하지 못한 채 현장 대응할 경우 더 큰 인명 및 재산 피해를 입을 수 있다. 이에 따라 정부 당국, 환경 단체, 그리고 과학계 등에서 HNS 재난사고에 대비한 연구에 관심을 갖고 있다.

사고 현장에 대한 신속한 초기 대응 방안을 마련하기 위해서는 사고 선박 근접역(near-field)에서의 HNS의 유출 및 확산 거동을 예측하는 것이 필요하지만, 이에 관련된 연구는 현재까지 거의 이루어지지 않았다. 그리하여 본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 통하여 HNS 별 사고 선박 근접역에서의 유출 및 확산 거동을 다양한 해류조건 하에서 예측하였다. HNS 물질로는 부유성 물질을 선택하였고, 해류 모델링을 통하여 다양한 해류유속 하에서 수치해석을 진행하였다. 해석 조건에 따른 HNS 확산 거동을 살펴보고 유층 두께, 해수면 평균 농도, 평균 전파 속도 등을 회귀 분석을 이용하여 모델링 하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 상용코드 ANSYS FLUENT(V.17.2)을 사용하고, 지배방정식으로는 질량보존방정식, 운동량방정식, 난류모델로는 standard k-ε 모델, 종 수송방정식을 이용하여 유출 및 확산 거동을 수치해석 하였다. 선박 근접역을 형상화한 개략도이다. 보다 정확한 근접역 HNS 유출 및 확산 현상을 시뮬레이션하기 위해 근접역 잔차류 모델링을 통해 수치해석 하였다. HNS 물질로는 스티렌의 물성값을 기준으로 가상의 부유성 HNS를 선택하였고, 물성값은 표 1에 나타내었다. 본 연구에서는 내부 케미컬 탱크 외벽 파공면에서 바로 바다로 유출된다는 시나리오를 고려하였다.

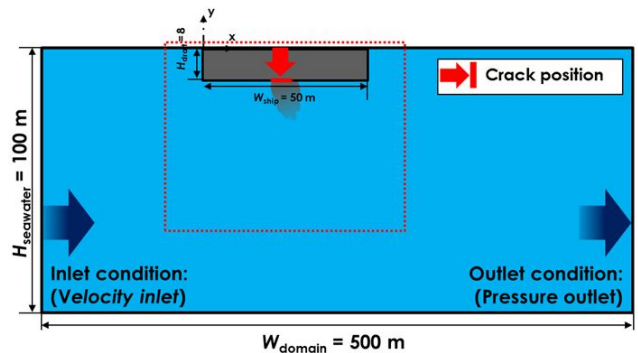


Fig. 1. Schematic of computational domain and boundary conditions.

Table 1. Arbitrary physical properties of floating HNS

	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m·s)	Diffusivity (m ² /s)
Floating HNS	500, 750, 900	0.00076	2.0 · 10 ⁻⁹

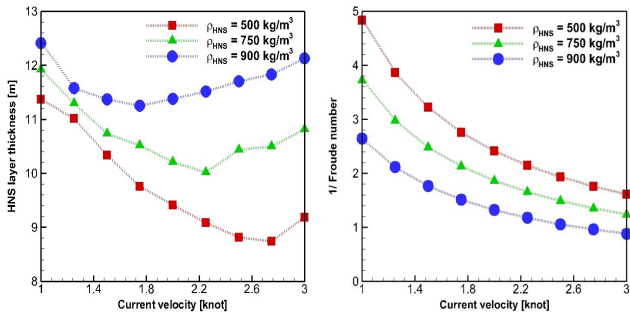


Fig. 2. Near-field HNS layer thickness.

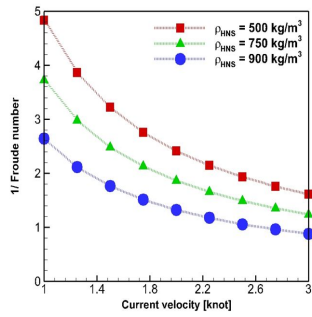


Fig. 3. Current velocity with respect to the modified Froude number.

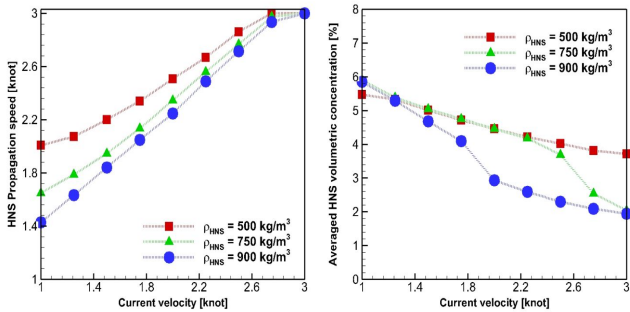


Fig. 4. Near-field HNS propagation speed

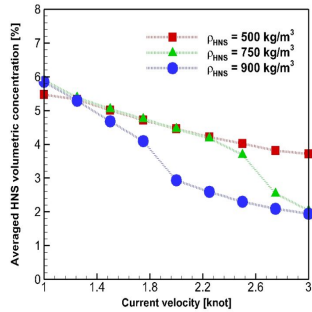


Fig. 5. Near-field HNS volumetric concentration

3. 수치해석 결과

본 수치해석의 목적은 부유성 HNS의 유출 및 확산 특성을 분석하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 해석조건에 따른 부유성 HNS의 확산 거동에 대한 정량적 분석을 수행한다. 우선, 해석 조건에 따라 영향을 받는 다음의 3가지 파라미터를 정의하였다. ① HNS 유층 두께, ② 평균 전파 속도, ③ 해수면 평균 HNS 농도. 우리는 1 knot ~ 3 knot 의 해류 유속, 500 kg/m³ ~ 900kg/m³ HNS 밀도 범위 안에서 시뮬레이션을 수행하고, 위 3 가지 파라미터들의 변화 경향을 분석하였다.

Fig. 5는 해석 범위에서의 HNS 유층 두께 변화를 나타낸다. 결과에 따르면, 밀도가 작을수록 얇은 유동층이 형성된다. 유동층 두께는 밀도조건에 따라 2 구간으로 나누어진다. 이를 설명하기 위해 관성력에 대한 부력의 비를 나타낸 수정된 Froude 수를 제안한다. 해류 유속에 따른 Froude 수의 역수 값을 Fig. 3에

나타내었다.

Fig. 4는 해석범위에서의 HNS 평균 전파 속도를 나타낸다. 상대적으로 작은 밀도의 부유성 HNS일수록 전파속도와 해류 유속사이의 차이가 커진다. 이는 해류 유속이 작은 경우 밀도가 작을 때 관성력에 비해 부력의 비율이 높음을 의미한다.

Fig. 5는 해석 범위에서의 해수면 HNS 평균 체적 농도를 나타낸다. 결과에 따르면, 부력에 대한 관성력의 비가 커질수록 근접역 내의 해수면 평균 체적 농도는 감소하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 사고선박 근접역 HNS 확산 예측 기술을 개발하기 위한 해류 모델 개발 및 HNS 확산 수치해석을 수행하였다. 잔차류 해류 모델을 적용하여 부유성 거동을 갖는 HNS에 대하여 유출 현상을 수치해석하여 확산 거동을 평가하였다. 결과는 다음과 같으며 이는 HNS 근접역 확산 예측 기술을 개발하기 위한 중요한 데이터로 사용 가능할 것으로 판단된다.

- (1) 모든 해류 속도에 대해 밀도가 작을수록 얇은 유동층이 형성된다. 평균 유층 두께의 3 구간으로 나뉘지며, 이 구간을 나누는 기준값은 Froude 수를 통해 예측 가능하다.
- (2) 해류유속이 낮고 밀도가 작은 경우에는, 해류 유속에 비해 빠르게 전파된다.
- (3) 밀도가 큰 경우에 해류 유속에 따라 체적 농도가 더 많이 감소하게 된다.

후기

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(위험유해물질(HNS)사고 관리 기술 개발)이다.

참고 문헌

- [1] McCay, D. P. F. (2006), "Spill hazard evaluation for chemicals shipped in bulk using modeling" Environmental Modelling & Software, vol. 21, pp. 156-169.
- [2] Cunha, I. S. (2015), "Review on hazardous and noxious substances (HNS) involved in marine spill incidents-an online database" Journal of Hazard Materials, vol. 285, pp. 509-16.
- [3] Harold, P. D. (2014), "Development of a risk-based prioritisation methodology to inform public health emergency planning and preparedness in case of accidental spill at sea of hazardous and noxious substances (HNS)" Environment International, vol. 72, pp. 157-63.