단순 형상 해양플랜트 내의 수소의 분산 시뮬레이션

석준* · 허재경** · 박종천***

*삼성중공업(주) 종합설계

**노르웨이선급협회

***부산대학교 조선해양공학과

Dispersion Simulation of Hydrogen in Simple-shaped Offshore Plant

Jun Seok*, Jae-Kyung Heo** and Jong-Chun Park***

*General Design, Samsung Heavy industry, Geoje, Korea

**DNV Korea Ltd., Busan, Korea

***Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Dispersion 분산, Hydrogen 수소, Simple-shaped offshore plant 단순형상 해양플랜트, 1-way interaction analysis 1-방향 상호작용 해석, Computational fluid dynamics(CFD) 전산유체역학

ABSTRACT: Lots of orders of special vessels and offshore plants for developing the resources in deepwater have been increased in recent. Because the most of accidents on those structures are caused by fire and explosion, many researchers have been investigated quantitatively to predict the cause and effect of fire and explosion based on both experiments and numerical simulations. The first step of the evaluation procedures leading to fire and explosion is to predict the dispersion of flammable or toxic material, in which the released material mixes with surrounding air and be diluted. In particular turbulent mixing, but density differences due to molecular weight or temperature as well as diffusion will contribute to the mixing. In the present paper, the numerical simulation of hydrogen dispersion inside a simple-shaped offshore structure was performed using a commercial CFD program, ANSYS-CFX. The simulated results for concentration of released hydrogen are compared to those of experiment and other simulation in Jordan et al.(2007). As a result, it is seen that the present simulation results are closer to the experiments than other simulation ones. Also it seems that the hydrogen dispersion is closely related to turbulent mixing and the selection of the turbulence model properly is significantly of importance to the reproduction of dispersion phenomena.

1. 서 론

오일·천연가스·회소광물 등 한정된 지상의 자원을 대신하여 해양자원 개발이 활발히 진행되고 있으며 이로 인해 심해저자원 생산을 위한 특수선박 및 해양플랜트의 발주량이 증가하고 있어 이들의 세계시장 규모는 급속도로 커지고 있는 추세이다. 하지만 이와 동시에 원유 및 천연가스를 생산 및 저장하는 해양구조물은 화재 및 폭발, 중량물 낙하, 크레인 그리고 누출 등과 같은 다양한 사고들이 발생하고 있으며, 이 중 인명·재산·해양환경에 치명적인 결과를 초래하는 화재 및 폭발 사고는 수학적 알고리즘 만으로는 충분히 규명하기 힘든 아주 복잡한 메커니즘을 가진 현상으로 설계 엔지니어링을 위해서는 반드시 이에 대한 정량적인 분석과 대책 마련이 불가피한 실정이다.

Fig. 1은 독일선급(Germanischer Lloyd, GL)에서 제안한 화재 및

폭발로 인한 구조물의 영향 평가 과정을 나타낸다(GL, 2008). 먼저 밸브 등과 같은 연결부위에서 유증기가 누출되고, 누출된 유증기가 해양구조물의 복잡한 상부 구조물들 사이에 집적된다. 누출된 유증기가 집적된 곳에 점화가 일어나게 되면 화재 및 폭발로 이어지게 되며 이 때 발생하게 되는 압력과 열이 구조물에 영향을 주게 되어 구조물은 본래의 기능을 상실하게 된다. Fig. 2는 해양구조물에서 탄화수소의 누출과 점화로 인한 사고의 통계자료이다(DNV, 2007). 매년 200여건의 누출사고가 발생하고 있으며, 이는 화재 및 폭발의 위험성을 내재하고 있기 때문에 해양구조물에서 화재 및 폭발 사고의 발생 가능성은 상당히 높다고 할 수 있다.

화재 및 폭발사고의 해석에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 기술이 종종 사용된다. Wilkening et al.(2008)은 ANSYS-CFX를 이용해 헬륨 가스의 누출 및 확산(Dispersion) 문제

Received 26 June 2013, revised 16 October 2013, accepted 16 October 2013

Corresponding author Jong-Chun Park: +82-51-510-2480, jcpark@pnu.edu

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper involves some part of contents from a master thesis of Pusan National University.

Fig. 1 GL's flowchart for fire and explosion analysis

Fig. 2 Statistics of hydrocarbon release and ignition accidents between 1996~2007

를 시뮬레이션 하였으며, Middha et al.(2009)은 상용프로그램 FLACS를 이용해 단순한 해양구조물 내부의 수소의 확산 시뮬레이션 결과를 실험과 비교하였다. 또한 Jordan et al.(2007)은 다양한 상용 프로그램을 이용한 확산 시뮬레이션을 통해 격막(Baffle)을 갖는 단순 사각 구조물에 대한 실험과의 검증을 수행하였다. 한편, 폭발현상은 미소 시간동안 발생하는 연소(Combustion) 현상이라 할 수 있으며, 연소에 대한 연구는 버너를 이용해 Gobby (2004), Yaldizli et al.(2008), Perkovic et al.(2009), Barlow and Frank(2007), Ogami and Fukumoto(2010), Seok et al.(2013)등에 의해 다양한 방법으로 연구되었다.

본 연구에서는 해양플랜트 구조물 및 특수선에 대한 폭발 사고의 피해를 예측하기 위한 기초연구로써 독일선급(GL)에서 제안한 화재 및 폭발해석의 전체 과정 중 수소의 노출에 따른 분산현상에 대해 상용프로그램인 ANSYS-CFX ver.11을 이용해 수소

분산 시뮬레이션을 수행하였다. 본래 분산 해석의 목적은 발생 빈도(Frequency of occurrence)와 관련된 당화확률론적인 구름 크기 분포(Equivalent stoichiometric cloud size distribution)를 산출하는데 있다. 본 연구의 해석 대상 모델로는 격막이 설치된 단순 사각 구조물 내에서 수소의 노출에 따른 농도 분포를 예측하고, Jordan et al.(2007)의 실험 결과 및 타 시뮬레이션 결과와의 비교·검증을 통해 향후 보다 복잡한 형상의 구조물에 적용 가능성을 검토하였다.

2. 분산(Dispersion)에 관한 지배방정식

2.1 분산

분산이란 하나의 물질 속에 다른 물질이 미립자 상태로 떠다니는 것 또는 파동의 파장에 따라 물질의 굴절률과 흡수율에 차이가 생기는 현상을 말한다. 분산과 비슷한 개념의 확산은 외부의 혼합작용이 없는 상태에서의 분자의 퍼짐을 말하며 외부의 혼합작용이 존재할 때의 분자의 퍼짐은 분산을 의미한다. 본 연구에서 분산은 외부의 혼합작용이 존재하며 하나의 물질 속에 다른 물질이 미립자 상태로 떠다니는 것을 의미한다.

서론에서 언급되었듯이 해양 구조물의 가스 누출로 인한 많은 사고 사례가 보고되고 있으며 이런 사고들에서 가스 누출 시 누출된 가스의 이동 경향 등을 파악하기 위해 분산에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 누출사고로 인해 누출된 가스는 바람 등의 자연 환경의 영향을 받으며 이동하게 되고 이 때 주변 구조물에 의해 일정 영역에 가스가 집적되면서 가스 구름(Gas cloud)을 형성하게 된다. 이렇게 생성된 가스 구름에 점화가 일어난다면 화재 및 폭발로 이어질 가능성이 높다. 점화가 일어나는 농도의 범위를 가연농도 범위라고 하며 기체 연료의 대표적인 수소, 메탄, 에탄 그리고 프로판의 경우의 농후가연한계농도(Limiting concentration of upper flammability)와 희박가연한계농도(Limiting concentration of lower flammability)는 Table 1에 나타난 것과 같다. 수소와 메탄의 경우 각각 4%, 5%로 희박가연한계농도는 비슷하지만 농후가연한계농도는 수소가 75%, 메탄이 15%로 수소가 메탄에 비해 약 5배가량 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 에탄과 프로판의 경우 비중이 1보다 커 누출사고 시 아래로 가라앉아 퍼져 나가며 수소와 메탄의 경우 상부로 퍼져나가는 특징을 갖는다.

2.2 지배방정식

본 연구의 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식, 그리고 수소의 농도 방정식이다.

Table 1 Characteristics of limiting concentration of flammability for gas fuel (25°C, 1atm)

	Lower %	Upper %	Specific gravity
Hydrogen	4.0	75.0	0.0696
Methane	5.0	15.0	0.5533
Ethane	2.9	13.0	1.0371
Propane	2.0	9.5	1.5210

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot [\mu_{eff}(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)] + \mathbf{B} \quad (2)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \nabla \mathbf{U} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = -\nabla \cdot \left(\lambda \nabla T + \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla h \right) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + S_E \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho X_{H_2})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} X_{H_2}) = \nabla \cdot \left\{ \left(\gamma + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla X_{H_2} \right\} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, ∇ 는 구배연산자, $\mathbf{U}$ 는 속도 벡터, μ_{eff} 는 유효점성계수, $\mathbf{B}$ 는 체적력, p' 는 수정된 압력, λ 는 열전도율, $\boldsymbol{\tau}$ 는 응력 텐서, Pr_t 는 난류 Prandtl 수($=0.85$), h_{tot} 는 총 엔탈피, h 는 정적 엔탈피, S_E 는 에너지 생성항, k 는 단위 질량당 난류 운동에너지, μ_t 는 난류점성계수, p 는 압력, X_{H_2} 는 수소농도, γ 는 수소의 분자 확산계수($=7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), Sc_t 는 난류 Schmidt 수($=0.7$)이다.

2.4 난류 모델

본 연구에서는 공학문제에서 일반적으로 많이 사용되는 Two-equation 난류모델인 $k-\varepsilon$ 난류모델을 기본 모델로 사용한다. 식 (2)의 유효점성 μ_{eff} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (6)$$

$k-\varepsilon$ 모델에서 난류 점성을 다음과 같이 난류운동에너지(k)와 난류소산율(ε)의 관계로 나타낼 수 있으며 계수 c_μ 는 0.09를 사용한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

위 식의 난류운동에너지와 난류소산율은 다시 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

여기서, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 이며, P_k 는 생성항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} \cdot (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} (3\mu_t \nabla \cdot \mathbf{U} + \rho k) + P_{kb} \quad (10)$$

단, P_{kb} 는 부력으로 인한 난류의 영향을 고려해 주는 부력 난류항이며, 4.4절에서 구체적으로 논하기로 한다.

3. 단순 형상 해양플랜트에서의 분산 시뮬레이션

3.1 단순 형상 해양플랜트

분산현상에 대한 해석을 수행하기 위해 Jordan et al.(2007)에

Fig. 3 Geometry of structure and position of sensors for dispersion simulation

의해 수행된 수소 분산 실험인 Test D27 자료를 이용하여 구조물을 모델링하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 실험에 사용된 구조물은 가로 1.2m, 세로 0.9m 그리고 폭 0.2m인 직사각형 형태의 구조물이다. 구조물의 왼쪽 하부에 수소 가스가 주입되는 주입구가 있으며, 주입구는 지름 0.012m이고 중심점과 바닥과의 거리는 0.145m, 폭 방향으로 중심에 위치한다. 또한 주입구는 구조물의 벽으로부터 내부로 0.03m 안으로 들어가 있으며, 60초까지 매초 당 9.89kg의 수소 가스가 주입된다. 구조물의 오른쪽에는 기체가 빠져 나갈 수 있는 출구가 존재하며 출구는 폭 0.1m, 높이 0.2m이며 출구의 밑면은 바닥으로부터 0.01m 상부에 위치한다. 구조물 내부에는 상부에 3개, 하단부에 1개의 총 4개의 격벽이 위치하며 크기는 폭 0.2m, 높이 0.3m이고 두께는 0.01m으로 크기는 모두 동일하다. 한편, 수소의 체적 농도(Volume concentration)를 측정하기 위하여 총 12개의 센서가 벽면에 부착되어 있다.

3.2 격자계 및 계산영역

분산 시뮬레이션에 사용되는 격자는 상용격자생성 프로그램인 Gridgen ver.15.15를 이용하여 Table 2와 같이 총 3가지 종류의 정규격자계를 생성하였다. 난류 경계층의 해상도가 중요하지 않은 시뮬레이션이기 때문에 구조물의 벽과 격벽 주변에 격자의 조밀도를 설정하지 않고 전체적으로 균일한 격자계를 사용하였다. 단, 수소가 주입되는 주입구 주변으로는 상대적으로 조밀도를 유지하도록 조절하였다. 한편, 격자수 증가에 따른 계산시간을 고려하여 구조물의 절반만 모델링하여 격자를 생성하였고 중심면에는 Symmetry 경계조건을 부여하였다.

출구의 계산영역 설정에 있어 배출되는 가스가 계산영역에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 4와 같이 구조물 외부에 각

Table 2 Number of grids used for dispersion simulation

Case	Coarse	Medium	Fine
Number of grids	141,192	276,052	372,804

Fig. 4 Grid system of dispersion simulation

각 0.3m, 0.6m 그리고 0.9m의 계산영역을 추가하여 총 4가지 종류의 출구 계산영역 크기에 대한 영향을 살펴보았다. 단, 구조물의 바깥부분에 추가하여 생성된 부분의 격자수는 계산영역이 0.3m씩 커질 때마다 17,700개의 동일한 정규격자를 추가적으로 사용하였다.

3.3 시뮬레이션 조건

시간의 변화에 따른 수소의 농도를 측정하기 위해 비정상(Transient)의 상태로 설정하였으며 총 계산 시간은 120s이다. 시뮬레이션의 시간 간격은 0.01s, 0.03s 그리고 0.05s의 3가지 시간간격에 대한 수렴성 평가를 수행하였다. 시뮬레이션 시 중력의 영향을 고려해 주었으며 본 연구에 사용된 공기와 수소는 ANSYS-CFX 데이터베이스의 Air at STP(Standard temperature and pressure)와 H2 at STP를 각각 사용하였다. 시간에 따라 센서 1, 2, 9, 10번에서 수소의 농도를 실험과 비교하였다.

수소가 유입되는 주입구에는 Inlet 경계조건을 설정하였으며 60초까지는 주입구를 통해 10.17m/s의 속도로 수소 가스가 주입되고, 60~120초 동안은 수소가스가 주입되지 않고 혼합되는 것을 관찰하였다. 기체가 유출입되는 출구는 기체의 유출입이 상대압력차이로 계산되는 Opening 경계조건을 설정하였으며 온도는 상온인 293.15K로 설정하였다. 벽과 격벽은 No-slip 경계조건과 단열 조건을 설정하였으며 온도는 상온으로 설정하였다.

구조물 내부 및 외부의 초기 상태는 공기만 존재하며 수소는 존재하지 않는다. 계산영역의 초기온도는 상온으로 설정하였다.

난류모델에 따른 수소 분산의 영향을 알아보기 위해 기본 모델인 $k-\epsilon$ 모델 외에 수정된 $k-\epsilon$ 모델인 RNG $k-\epsilon$ 모델 그리고 $k-\omega$ 모델, DES(Detach eddy simulation), SST(Shear stress transport) 등의 다양한 난류모델을 적용하여 분산문제에서의 난류모델에 따른 변화를 비교하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 격자 수렴성 평가

전술한 세 종류의 격자를 이용하여 격자의 수렴성 평가를 수

Fig. 5 Domain size for dispersion simulation

행하였다.

Fig. 6에는 센서 1, 2, 9, 10번에서 측정된 수소 농도의 시간변화를 나타낸다. 센서 1, 2번에서는 격자의 크기에 따른 차이는 거의 보이지 않는다. 하지만 센서 9번에서는 Coarse의 결과가 나머지 두 경우와 비교하여 약 5s 이후 상대적으로 작은 값을 보이고 있으며 30s 이후에서는 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 그에 비해 Medium과 Fine의 경우는 거의 일치하는 경향을

Fig. 6 Time-sequential hydrogen concentration for grid convergence test

Fig. 7 Time-sequential hydrogen concentration for domain test

보이고 있다. 센서 10번에서도 Coarse의 경우가 약 10~20s 구간에서 다른 두 경우에 비해 큰 값을 나타내고 있다. 전체적으로 Fine으로 갈수록 시뮬레이션 결과는 수렴해 가는 것을 확인할 수 있으며, Medium과 Fine의 경우 시뮬레이션 결과에 큰 차이를 보이고 있지 않아 계산시간을 고려하여 추후 수행되는 시뮬레이션에는 Medium 격자를 사용하기로 한다.

4.2 출구 계산영역 평가

격자 수렴성 평가로 얻어진 Medium 격자를 사용하여 출구 계산영역에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. 센서 1번의 결과에서 부분적으로 출구 계산영역의 크기에 따른 수소 농도의 값이 차이 나고 있지만 1% 미만의 근소한 차이를 보인다. 이로써 출구 계산영역의 크기는 수소의 분산 문제에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되지만, 구조물 외부로 유출되는 수소의 양을 파악하기 위해 추후의 시뮬레이션에는 외부영역이 0.3m 추가된 Domain2를 사용하였다.

4.3 시간증분량 평가

시간 변화에 따른 과도해석의 상태로 시뮬레이션을 수행하기 때문에 시뮬레이션의 시간 증분량 결정을 위해 0.01s, 0.03s 그리고 0.05s의 3가지 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 센서 1, 2, 9번에서는 3가지 경우의 시뮬레이션이 부분적으로 근소한 차이는 보이나 전반적으로 거의 동일한 결과가 나타난 것으로 보인다. 하지만, 센서 10번의 결과에서 0.05s의 경우 다른 두 경우의 결과에 비해 10s~20s 영역에서 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 하지만 전체적으로 시간 증분량이 0.01s로 갈수록 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 시뮬레이션을 수행함에 있어 계산시간을 고려하여 시간증분량은 0.03s로 설정하여 추후 수행되는 시뮬레이션들에 적용하였다.

4.4 부력 난류항 평가

앞서 수행했던 격자 수렴도, 계산영역 그리고 시간증분량 시뮬레이션 결과를 기반으로 $k-\epsilon$ 난류모델의 정확도를 향상시키기 위해 부력 난류항(Buoyancy turbulence term)을 추가적으로 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 식 (10)의 우변 마지막 항의 P_{kb} 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} g \cdot \nabla \rho \quad (11)$$

여기서, Boussinesq 근사에 의한 부력을 고려할 경우 σ_p 는 0.9를 사용하지만 본 연구에서는 이를 고려하지 않기 때문에 본 연구에서는 $\sigma_p = 1.0$ 로 설정하였다.

부력 난류항을 고려하여 시뮬레이션 수행한 결과는 Fig. 9와 같다. 센서 1, 2번의 결과에서 알 수 있듯이, 초기 수소가 검출되는 시간이 부력 난류항을 고려함으로써 실험에 보다 근접해지며 검출 농도의 증가 추세 또한 유사한 경향을 나타내고 있다. 부력난류항을 고려한 경우 센서 1, 2번에서는 약 40s까지의 수소 농도가 낮게 검출되고 있으며, 센서 9에서는 약 30s 이후의 수소 농도가 높게 나타나, 난류모델의 정확도가 보다 향상된

것을 알 수 있다. 결과적으로 부력 난류항을 고려한 경우 분사 초기 단계의 관성력에 영향을 미치고 있으며, 이에 따라 낮은 위치에 설치된 센서 1, 2의 검출결과가 상당부분 개선되었고, 이는 상부에 위치한 센서 9, 10의 수소농도를 증가시키는 결과로 이어진 것으로 판단된다. 따라서 이후의 시뮬레이션에서는 부력 난류항을 적용하기로 한다.

4.5 난류모델 평가

유출된 가스는 분자질량이나 온도에 의한 밀도차 뿐만이 아니라 특히 난류 혼합(Turbulent mixing)의 기여에 의해 주위의 공기와 혼합되며 희석된다. 따라서 적절한 난류 모델의 선택은 분산 시뮬레이션의 정확도 향상에 있어 중요한 요소일 것이다.

본 절에서는 앞서 수행된 시뮬레이션에서 기본적으로 사용한 $k-\epsilon$ 난류모델 외에 RNG $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST 그리고 DES와 같은 다양한 난류모델에 대해 비교해 보았다.

Fig. 10은 다양한 난류 모델에 따른 분산 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전체적으로 사용된 난류 모델에 따라 분산 형태가 심하게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 센서 1번의 결과에서 본 연구에 사용된 5가지 난류모델은 시간에 따라 유사한 기울기로 변화하는 경향을 나타내고 있지만 수소가 검출되는 시간과 양에서는 큰 차이를 보이고 있다. 수소가 검출되는 시간은 $k-\omega$, SST, $k-\epsilon$, DES 그리고 RNG $k-\epsilon$ 의 순서로 빠르게 검출되고 있으며, 60s에서의 수소 농도 역시 동일한 순으로 높게 검출되고 있다. 수소가 검출되는 시간은 RNG $k-\epsilon$ 난류모델이 실험과 가장 유사한 경향을 보이고 있으며 60s에서의 수소 농도를 비교하면 $k-\epsilon$ 난류모델과 DES 난류모델을 사용했을 때 상대적으로 실험에 근접한 결과를 보인다. 센서 2번에서의 결과 역시 수소가 검출되는 시간과 60s에서 수소의 농도 역시 센서 1번의 결과와 동일한 결과를 보이고 있다. 따라서 구조물의 하부에 위치한 센서 1, 2번에서는 RNG $k-\epsilon$, DES, $k-\epsilon$ 의 3가지 난류모델이 다른 난류모델보다 상대적으로 유리하다고 볼 수 있다. 한편, 구조물의 상부에 위치한 센서 9번과 10번에서는 센서 1, 2번에서와는 다른 경향을 보이고 있다. 센서 9번에서는 $k-\epsilon$ 과 $k-\omega$ 난류모델이 다른 난류모델들에 비해 상대적으로 실험과 유사한 경향을 나타낸다. 센서 10번에서는 20s 이후 SST 난류모델의 결과가 좋아 보이며, $k-\epsilon$ 난류모델의 경우 SST 모델에 비해 상대적으로 실험값과는 차이를 보이고 있지만 전체적인 변화의 기울기는 실험값과 유사함을 보인다. 60s에서의 수소의 농도는 $k-\omega$, SST 난류모델은 실험값보다 작은 값을, $k-\epsilon$, DES, RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 실험값보다 큰 값을 보이고 있다.

결과적으로 4가지 센서에서의 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교해 보았을 때 보편적으로 $k-\epsilon$ 난류모델이 적합할 것이라 판단되어 $k-\epsilon$ 난류모델을 이후의 최종 시뮬레이션에 적용하였다.

4.6 타 시뮬레이션 결과의 비교

앞서 수행한 격자 수렴성, 출구 계산영역, 시간증분량, 부력 난류 항(Buoyancy turbulence term) 그리고 난류모델 평가를 통해 얻어진 시뮬레이션 조건을 적용하여 현업에서 널리 이용되고 있는 상용프로그램인 FLACS(FLame acceleration simula-

Fig. 8 Time-sequential hydrogen concentration for time interval test

Fig. 9 Time-sequential hydrogen concentration w/ and w/o buoyancy turbulent terms

Fig. 10 Time-sequential hydrogen concentration for turbulence model tests

Fig. 11 Time-sequential hydrogen concentration compared with FLACS simulation results

tor)의 시뮬레이션 결과(Jordan et al., 2007)와 비교를 수행하였다.

Fig. 11은 본 시뮬레이션 결과를 Jordan et al.(2007)의 실험 및 FLACS에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타낸다. 센서 1번에서 수소가 주입되는 60s 동안은 실험에 비해 시뮬레이션의 값이 크게 차이가 나며, 최댓값이 나타나는 시간 또한 실험과 차이가 난다. 수소가 주입되지 않는 60s~120s 동안 시뮬레이션 결과는 실험결과와 유사하게 수소의 농도가 진동을 하면서 다소 감소하는 것을 볼 수 있지만 수소 농도의 감소폭이 실험에 비해 작은 것을 확인 할 수 있다. 하지만 본 연구에서 얻은 시뮬레이션 결과가 수소가 주입되는 60s까지 FLACS의 시뮬레이션

결과에 비해 상대적으로 실험에 보다 근접하며, 60s 이후에도 수소 농도의 감소가 거의 없는 FLACS의 시뮬레이션 결과에 비해 실험과 좀 더 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 센서 2번의 본 시뮬레이션 결과에서도 FLACS에 비해 수소농도의 증가율은 개선되어 보이나 약 70s~120s의 영역에서는 실험결과와 다소 차이를 나타내고 있다. 특히 최댓값이 나타나는 시간 및 그 이후의 경향 역시 실험결과와는 차이를 나타낸다. 한편, 센서 9번에서는 수소가 주입되는 60s까지 두 시뮬레이션 결과가 실험과 유사한 경향을 나타낸다. 하지만 60s 이후 주입구로부터 수소의 공급이 중단된 후 수소의 농도가 일정한 채 유지되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 Snap-shot of hydrogen concentration field in the middle section of structure

이는 시뮬레이션에서는 갑작스런 수소의 공급 중단이 가능하지만 실험에서는 밸브의 조절에 따른 수소 잔량의 영향에 의한 것으로 판단된다. 센서 10번에서는 수소가 주입되는 60s 동안 실험값에 비해 수소농도가 다소 과대하게 측정되는 것을 볼 수 있지만 60s 이후의 결과는 FLACS의 결과에 비해 본 시뮬레이션의 결과가 실험값과 보다 근접한 경향을 보인다.

Fig. 12는 수소가 주입되는 60s까지의 수소 농도의 시간변화를 나타낸다. 주입구로부터 공급된 수소는 공기보다 가벼워 대부분 센서 9번과 10번 사이의 격벽 근방으로 상승하고 이후 주변으로 분산되는 모습과 수소의 구름 분포를 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 CFD를 이용한 복잡한 해양구조물에 화재 및 폭발 해석에 앞서 독일선급에서 제안한 6단계의 절차 중 단순 사각형상의 해양구조물에서 수소 분산 문제에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 정확도 향상을 위해 격자 수렴성, 출구 계산영역, 시간증분량, 부력 난류 항, 난류모델 등의 다양한 민감도 테스트를 통해 최적의 시뮬레이션 조건을 도출하였으며, 특히 난류모델의 선택과 부력 난류항의 고려가 중요하다는 결론을 도출해 낼 수 있었다. 본 시뮬레이션의 결과는 Jordan et al. (2007)에 의해 수행된 실험 및 타 상용프로그램과의 비교를 통해 정확도를 평가하였다. 결과적으로 해양구조물의 화재 및 폭발 해석 시 정도 높은 결과를 얻기 위해서 난류모델의 선택이 중요하며, 혼상유동의 부력을 고려한 난류모델의 연구 개발도 시급한 과제 중 하나가 될 것으로 보인다. 향후 화재 및 폭발에 관한 정확한 시뮬레이션의 입력 정보(예를 들어, 노출 시 조건, 초기 난류 강도, 구조물의 재질 등)가 주어진다면 보다 복잡한 형상에 대한 화재 및 폭발 해석에 적용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Barlow, R., Frank, J., 2007. Piloted CH₄/Air Flames C, D, E, and F - Release 2.1. TNF Workshop, Washington, USA. [Online] (Updated January 2003) Available at: <<http://www.sandia.gov/TNF/DataArch/FlameD.html>> [Accessed October 2013].
- Det Norske Veritas(DNV), 2007. Accident Statistics for Floating Offshore Units on the UK Continental Shelf 1980-2005. Health and Safety Executive(HSE) Report. [Online] (Updated 2007) Available at: <<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr567.pdf>> [Accessed October 2013].
- Germanischer Lloyd(GL), 2008. Consequence Evaluation (Fire, Release, Explosion, Dispersion), including CFD, Safety & Risk Management Services, issue No 001. [Online] (Updated May 2008) Available at: <http://www.gl-group.com/pdf/Consequence_Evaluation.pdf> [Accessed October 2013].
- Gobby, D., 2004. Piloted methane jet flame, ANSYS CFX Validation Report, CFX-VAL09/0404.
- Jordan, T., Carcia, J., Hansen, O., Ledin, A., Middha, P., Molkov, V., Travis, J., Venetsanos, A.G., Verbecks, F., Xiao, J., 2007. Results of the Hysafe CFD Validation Benchmark SBEPV5. Proceedings of 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian Spain. [Online] (Updated September 2007) Available at: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2007/fileadmin/user_upload/CD/PAPERS/11SEPT/1.1281.pdf> [Accessed October 2013].
- Middha, P., Hansen, O.R., Storvik, I.E., 2009. Validation of CFD-model for Hydrogen Dispersion, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(6), 1034-1038.
- Ogami, Y., Fukumoto, K., 2010. Simulation of Combustion by Vortex Method. Computers & Fluids, 39(4), 592-603.
- Perkovic, L., Baburic, M., Priesching, P., Duic, N., 2009. CFD Simulation of Methane Jet Burner. Proceeding of the European Combustion Meeting, Vienna Austria. [Online] (Updated April 2009) Available at: <<http://bib.irb.hr/datoteka/398216.P810270.pdf>> [Accessed October 2013].
- Seok, J., Jeong, S.-M., Park, J.-C., Paik, J.-K., 2013. CFD Simulation of Methane Combustion for Estimation of Fire and Explosion in Offshore Plant, Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(2), 59-68.
- Wilkening, H., Baraldi, D., Heitsch, H., 2008. CFD Simulation of Light Gas Release and Mixing in the Battelle Model-Containment with CFX. Nuclear Engineering and Design, 238(3), 618-626.
- Yaldizli, M., Mehravaran, K., Mogammad, H., Jaber, F.A., 2008. The Structure of Partially Premixed Methane Flames in High-intensity Turbulent Flows. Combustion and Flame, 154(4), 692-714.