

# 지하 복합발전 플랜트 내부의 가스 누출 특성에 대한 수치해석 연구

방주원<sup>1</sup>, 성건혁<sup>2</sup>, 유홍선<sup>2</sup>, 이성혁<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과, <sup>2</sup>중앙대학교 기계공학과

## Numerical Study on Characteristics of Gas Leakage in an Underground Combined Cycle Power Plant

Joo Won Bang<sup>1</sup>, Kun Hyuk Sung<sup>2</sup>, Hong Sun Ryou<sup>2</sup>, Seong Hyuk Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical System Engineering, Chung-Ang University

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

**요약** 본 연구에서는 수치해석 기법을 활용하여 간략화된 지하 복합발전 플랜트 내 과공 위치에 따른 가스 확산 및 유동 특성을 고찰하였다. 특히 가스 누출 위치 주변의 장애물 배치가 밀폐 공간 내부의 가스 농도 분포에 미치는 영향을 분석하였으며, 메탄가스의 가연 한계 값을 이용하여 누출 특성을 정량적으로 비교하였다. 수치해석 결과, 분사류 주변으로 수직 벽면이 있을 경우, 장애물이 횡 방향 유동을 제한하여 종 방향 누출 거리가 장애물이 없을 경우에 비해 약 60% 가량 증가하였다. 하지만 Air filter가 가스 분사류 경로에 있을 경우, 횡 방향 누출 거리는 장애물이 없을 경우에 비해 최대 8배까지 증가하였다. 이러한 이유는 분사류가 수평 및 하부 방향으로 굴절되어 장애물 주변으로 재순환 유동이 형성되었기 때문이다. 따라서 밀폐 공간 내 사고 방지 시스템 설계 시 주요 설비 위치 및 공간 구조가 누출 분사류 경로에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다.

**Abstract** The present study numerically investigated the gas leakage characteristics in a simplified underground combined cycle power plant. The effect of obstacles near a crack location on the gas concentration in the confined space was analyzed by using the lower flammable limit (LFL) of methane gas. When the jet flow was close to the vertical walls, the longitudinal leakage distance increased by about 60% (when an obstacles was present) compared to the case without any obstacle, because these obstacles prevented transverse flows. In addition, when an air filter was installed near to the trajectory of the gas flow, the longitudinal leakage distance was similar to the distance between the crack and obstacle, whereas the transverse leakage distance increased up to 8 times compared to the case without any obstacle. As the jet flow impacts on the obstacle and changes its direction, the gas flows recirculate. Therefore, it is necessary to consider the effect of the structure and facility locations on the trajectory of the jet flow to propose an accident prevention system in confined spaces.

**Keywords** : Combined Cycle Power Plant, Computational Fluid Dynamics, Confined Space, Gas Leakage, Obstacle Effect

### 1. 서론

최근 천연가스의 가격 하락과 복합발전플랜트의 높은

효율로 인해 현재 전 세계적으로 수요가 증가하고 있다. 하지만 복합발전 플랜트 (Combined Cycle Power Plant, CCPP)는 일반적으로 가스터빈, HRSG(Heat Recovery

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과입니다 (No. 20141010101850).

\*Corresponding Author : Seong Hyuk Lee(Chung-Ang Univ.)

Tel: +82-2-820-5254 email: shlee89@cau.ac.kr

Received April 8, 2016

Revised May 11, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

Steam Generator) 및 가스 저장 탱크 등과 같은 대규모 설비들로 인해 많은 건설공간을 요구한다. 따라서 지하 공간내의 가스 누출에 따른 특성을 분석하고, 정량적인 데이터를 기반으로 한 안전 시스템을 구축하는 것은 발전시스템의 지속적인 안전을 확보하는 데에 중요하다.

견고한 안전 시스템을 구축되기 위해서 위험도 정량화 기법(Quantitative Risk Assessment, QRA)을 활용한 체계적 평가가 필요하다. 최근까지도 QRA에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, QRA 방법은 대표적으로 5가지의 단계로서 시스템 정의, 위험성 정의, 사고시나리오 정의, 그리고 전산유체역학 해석의 단계로 구성된다 [1,2]. Jo 와 Ann [3] 은 정량적 통계 기록과 QRA 방법을 통해 LNG의 수송 파이프로부터 누출 속도를 분석하였다. Dong 등[4]은 LNG의 연소 하한계를 통한 수치해석을 진행 하였고, 파공의 크기와 주위 환경에 대한 영향을 분석 하였으며, 파공크기에 따라 달라지는 위험 영역을 정의하였다. Choi 등[5]은 LNG와 LPG의 화재와 폭발에 관한 거동 및 특성을 규명 하여, 물성 변화에 따른 다양한 피해 평가인자를 제안하였으며, Qi 등[6]은 압력 용기에서 가스 누출에 의한 피해를 정량화하고, 누출량 증가로 인한 피해범위를 분석하여, 장치 손상의 피해를 정리하였다. Sun 등[7]은 주위기류가 LNG 가스 확산에 미치는 영향을 실험과 수치해석결과와 비교하였으며, 바람의 세기에 따른 피해 영역을 정의하였다. Yet-Pole 등 [8]은 석유 화학 공장에서 나프타가 누출이 되었을 때 화재 및 폭발에 관하여 수치해석을 진행 하였으며, 사고 결과를 정확하게 예측하기 위해 압력과 온도를 분석하여, 연소 범위를 정의하였다. Kim 등[9]은 tube trailer에서 가스 누출에 따른 사고 피해예측에 관하여 연구를 진행 하였으며, 누출공의 크기, 압력 등을 조절하여 가스 폭발의 피해 거리를 평가하였으며, 사고 시 피해를 최소화하기 위한 방안을 제시하였다.

다양한 환경 및 조건에서의 가스 누출 특성에 관한 많은 연구들이 진행 되었으나, 밀폐 공간 내 고압가스 누출 시 가스의 확산 및 가스의 유동에 관한 연구는 부족한 실정이다. 지하복합발전 플랜트는 주 발전 연료로서 LNG 가스 사용하고 있으며, LNG 가스 특성 상 밀폐공간에서는 확산하던 주변 벽에 의해 확산이 제한되어 다시 하단부로 내려오며 재순환 유동이 발생하기 때문에 공간 내부에 개방형과는 다른 현상을 보인다. 따라서 가스 누출에 대한 거동을 예측하고, 확산 특성을 이해하는

것은 중요하다.

따라서 본 연구에서는 지하 공간 복합발전 플랜트 내 파공 위치에 따른 누출 가스의 유동 및 확산 특성을 분석하였다. 그리고 가연 한계농도를 기반으로 누출거리를 계산하여 누출 가스 분사류(Jet flow) 주위 장애물 배치가 공간 내 유동과 가스 확산에 미치는 영향에 대해 비교 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 연구내용

#### 2.1.1 지배방정식

가스 누출 특성을 분석하기 위해 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 종 수송 방정식을 사용하였다. 연속 방정식과 운동량 방정식은 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = & \quad (2) \\ -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho \vec{g}, \end{aligned}$$

이때,  $\rho$ 는 유체의 밀도이며,  $u$ 는 유체의 속도이다.  $P$ 는 유체의 압력,  $\mu$ 는 유체의 점성이다. 한편, 에너지 방정식과 종 수송방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_j h_j \vec{J}_j \right] + S_h, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_q) + \nabla \cdot (\rho u Y_q) = -\nabla \cdot \vec{J}_q, \quad (4) \end{aligned}$$

여기서  $E$ 는 에너지를 의미하며,  $k$ 는 유체의 열전도도,  $C_p$ 는 비열용량,  $\mu_t$ 는 난류점성이며,  $Pr_t$ 는 프란틀 수,  $T$ 는 유체의 온도이다.  $h_q$ ,  $J_q$ ,와  $Y_q$ 는 각각 엔탈피, 확산 플럭스 그리고  $q$ 종의 의 질량분율 이다. 난류모델은 식 (5)과 식 (6)의 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon,$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (6)$$

식(6)에서  $G_k$ 는 난류 운동 에너지이고  $G_b$ 는 부력항이다.  $C_1, C_2, C_\mu$ , 그리고  $\alpha_k$ 는 난류 모델 계수이며, 각각 1.44, 1.92, 0.09, 1.3을 적용하였다 [10].

과공에서 누출되는 질량유량을 결정하기 위해 압축기체 연료가 누출될 때의 질량유량에 대한 식(7)을 이용하였다[11,12]. 여기서  $C_d$ 는 과공특성에 관한 실험상수이며, Round orifice의 평균값 0.97을 사용하였다. 이때,  $A_h$ 는 과공의 면적이며,  $P_0$ 와  $W_g$ 는 LNG의 내부 압력과 가스의 분자량이다[11,12]. 또한,  $R$ 은 기체상수,  $\gamma$ 는 정적비열에 대한 정압비열의 비율이다.  $K$ 는 가스 누출속도 상수이며, 식 (8)과 같다.

$$\dot{m} = C_d A_h P_0 K \sqrt{\frac{W_g}{\gamma R T}} \quad (7)$$

$$K = \gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (8)$$

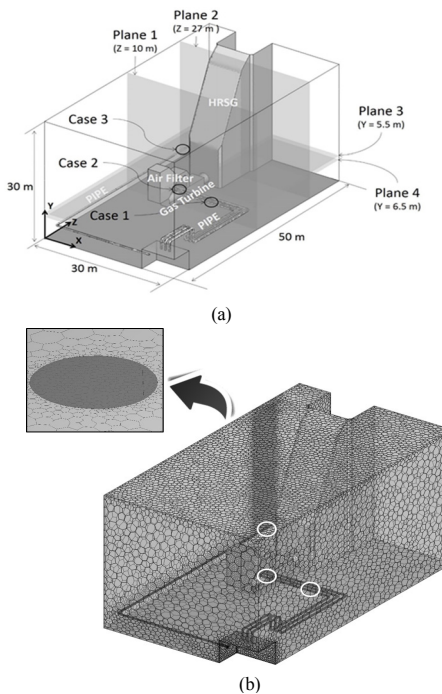


Fig. 1. (a) Schematic of computational domain  
(b) computational grid

### 2.1.2 형상 모델링 및 격자 독립성 테스트

지하 공간 복합 발전 플랜트의 주요 설비중 하나인 HRSG, 공기필터, 터빈, 연료 배관, LNG 탱크를 모델링 하였으며, 전체 공간 크기는 30 m × 50 m × 30 m 이다. 누출 가스 분사류(Jet flow) 주위 장애물 배치가 공간 내 유동 및 가스 확산에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 누출 위치에 따라 총 3 case 해석을 수행하였다. Case 1의 경우 누출 위치 주위에 반경 5 m 이내에 장애물이 없으며, 반면에 Case 2의 경우에는 각각 과공 위치 상부 2.8 m 지점에 공기 필터가 있고 Case 3의 경우에는 반경 5 m 이내에 수직 벽과 HRSG가 위치하고 있다. 누출 지점의 과공 크기는 15 mm이며, 내부 압력과 가스 온도를 각각 10 MPa과 173 K 조건을 적용하였을 때, 식 (7)을 이용하여 계산된 누출 가스의 질량 유량은 0.20466 kg/s 이다. 누출 연료는 LNG의 주성분인 메탄으로 가정하였다.

초기 내부 온도 300 K, 대기압 조건으로 설정 하였고, 시간에 따른 유동 특성을 확인하기 위해 180 초까지 과도해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 상용프로그램인 ICEM v16.1을 사용하여 Fig. 1(b)와 같이 다면체 격자를 생성 하였다. 격자의 독립성을 확인하기 위해 격자 독립성 테스트를 수행하였으며, 누출 위치는 Case 1과 동일하고 경계 조건은 본 해석과 동일하게 설정하였다. Fig. 2와 같이 종방향으로의 누출거리를 비교하여 오차율이 가장 적은 120 여만 개의 격자수를 선택하여 해석을 진행 하였다.

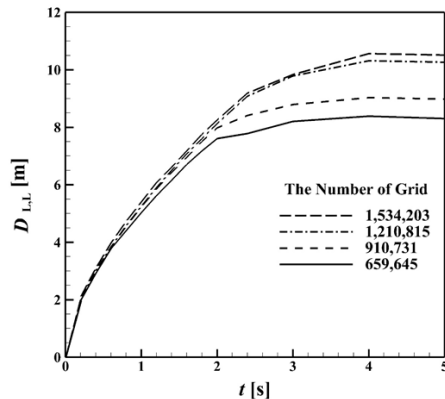


Fig. 2. Time-varying longitudinal distance according to the number of cell in grid

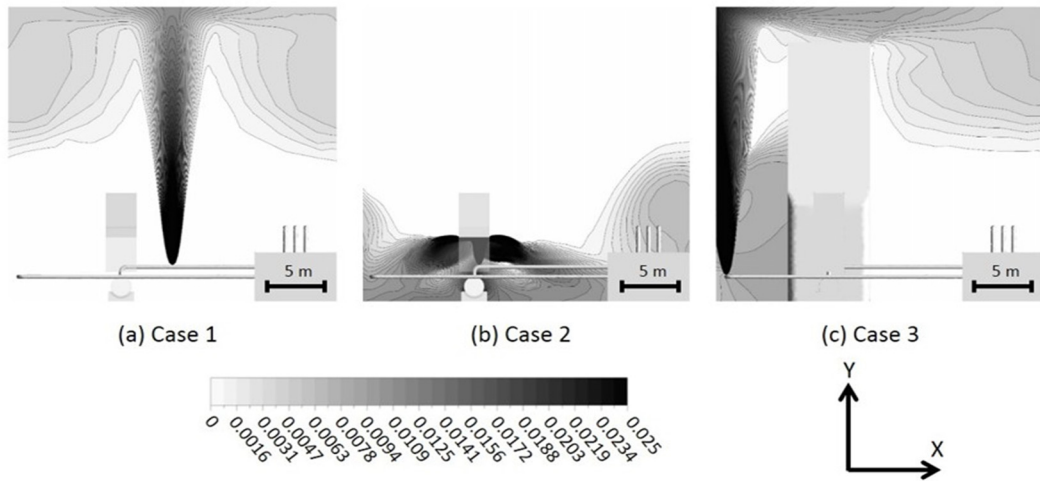


Fig. 3. The predicted volume fraction of leaking gas at  $t = 180$  s (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

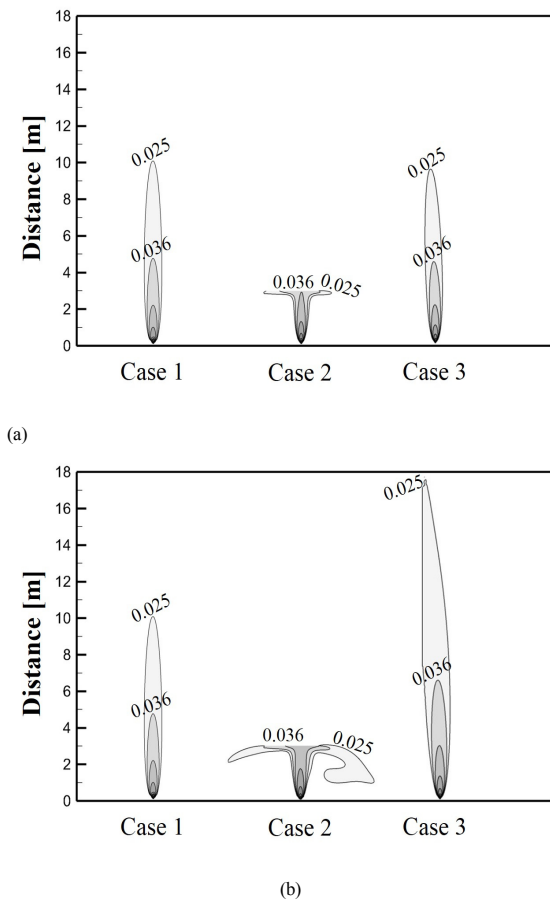


Fig. 4. Leakage distance for different crack positions at plane 1 and 2 (a) 10 s (b) 180 s

## 2.2 수치해석 결과

본 연구에서는 화재 및 폭발의 가능성이 높은 연소 하한계(Lower Flammable Limit, LFL)를 고려하였으며, 메탄의 LFL 값은 2.5 % 이다[13]. Fig. 3은 누출시간이 180 초일 때, 파공에서 누출되는 메탄분포를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)는 장애물이 없는 경우, 누출 가스는 상승하여 상단부에 도달한다. 상단부에 도달한 가스는 옆 벽면을 따라 하단부로 하강하여 재순환한다. Fig. 3(b)에서는 누출 후 상승하던 가스가 장애물에 부딪쳐 주 유동이 횡으로 굴절되고, 시간이 지남에 따라 상단부로 상승된다. Fig. 3(c)는 누출 지점 주위의 수직 벽면 및 HRSG로 인하여 수평 방향으로의 가스 확산이 제한된다. 특히 Ceiling jet이 벽면에 충돌한 후 벽면을 따라 재순환되어 누출 지점 주위의 협소한 공간으로 가스 농도가 급격히 증가한다.

Fig. 4는 한계영역에 집중하기 위해 시간이 지남에 따라 성장하는 가연한계 이상의 농도 분포 범위를 나타낸 것이다. Case 1의 경우 누출 초기에는 한계영역의 변화는 작지만, Case 3의 경우 벽면의 영향으로 인해 가스 유동이 상부 방향으로 가속되어 한계영역이 빠르게 수직 방향으로 성장한다. Case 2의 경우 분사류가 장애물(Air filter)에 충돌 후 수평방향으로 바뀌어 전체공간의 하부에서 상부 쪽으로 가스가 확산되며, 수평 방향으로 크게 성장한다.

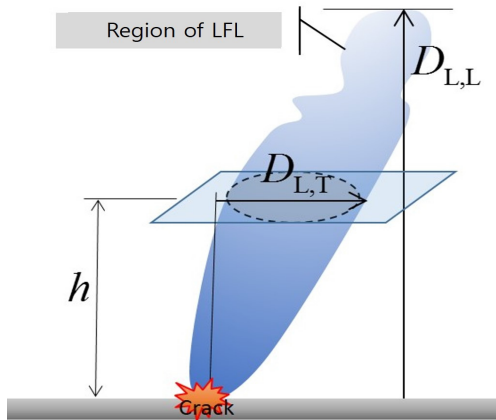
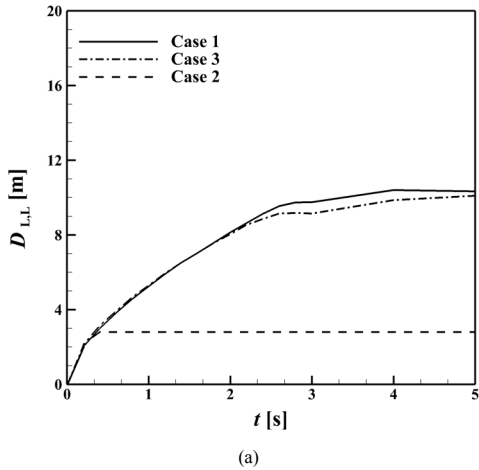
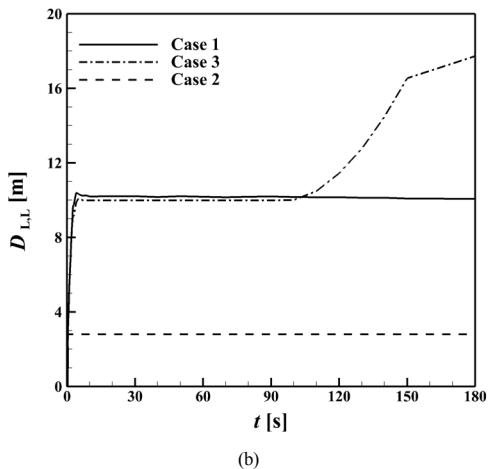


Fig. 5. Definition of leakage distances.

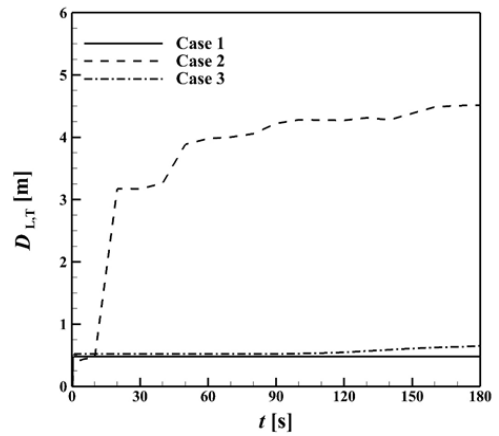


(a)

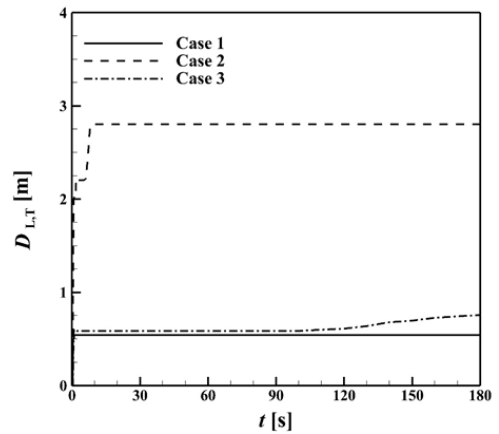


(b)

Fig. 6. Time-varying longitudinal leakage distance ( $D_{L,L}$ ) for different crack positions (a) 5 s (b) 180 s



(a)



(b)

Fig. 7. Time-varying transverse leakage distance ( $D_{L,T}$ ) for different crack positions (a)  $h_1 = 1.8$  m (b)  $h_2 = 2.8$  m

본 연구에서는 연소 하한계 영역에서의 위험 영역을 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 가스의 종단면과 횡단면의 최대 누출 거리  $D_{L,L}$ 과  $D_{L,T}$ 를 정의하였다. Fig. 6은 시간에 따라 변하는  $D_{L,L}$ 을 나타낸 그래프이다. 100초 이전까지 Case 1과 Case 3은 서로 유사한 종 방향으로의 누출거리 성장 경향을 나타내는 반면, Case 2의 경우 종 방향 누출거리가 약 60% 이상 낮다. 이러한 원인은 분사류가 장애물에 부딪힌 후, 진행 방향이 바뀌어 장애물이 종 방향 연소 하한계 영역의 성장을 막기 때문이다. 특히, Case 2의 종 방향 누출 거리는 18 초까지 일정하다. 반면 Case 3의 경우, 100 초 이후 종 방향 누출거리가 급격하게 증가하며, 180 초일 때 약 80% 가량 크다. 누출 지점 주위의 수직 벽 면 및 HRSG가 수평방향으로

의 가스 확산이 제한된다. 이후 Ceiling Jet가 벽면을 따라 협소한 공간으로 집중되어 100 초 이후 중 방향 누출 거리가 증가한다.

Fig. 7은 시간에 따라 변하는  $D_{L,T}$ 를 나타낸 그래프이다. Case 2의 경우, 분사류가 장애물에 부딪혀 수평 또는 공간의 하부 방향으로 굴절되어, 바닥 면을 따라 가스 유동이 형성된다. 이후, 가스가 공기보다 가벼워 공간 양쪽 벽면에서 부력에 의해 상부 공간으로 확산된다. 따라서 누출 지점으로부터 높이가  $h_1$  과  $h_2$  인 경우 모두에서 횡 방향 누출 거리가 10초 이내에 급격하게 성장하여 Case 1과 Case 3에 비해 최대 6~8배 차이가 발생한다. 또한, 장애물 주위 하부 공간에 재순환 유동이 형성되어  $h_2$ 에 비해  $h_1$  평면에서의 횡 방향 누출거리가 지속적으로 성장한다. 하지만 Case 3의 경우 상단부에 장애물이 없으므로, Case 1과 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 100초 이후 HRSG 주변으로 국부적인 재순환 영역으로 인하여 Case 3의 경우  $D_{L,T}$ 이 증가함에 따라  $D_{L,T}$  또한 증가함을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 지하 복합발전플랜트에서 장애물 배치로 인한 누출 가스 분사류의 유동 및 가스 확산에 미치는 영향을 분석하였으며, 결론은 다음과 같다:

누출 가스의 분사 경로에 장애물이 없는 경우, 시간이 지남에 따라 한계영역의 변화가 나타나지 않으며, 가스의 분사 경로에 장애물이 있을 경우 장애물 하부 공간의 가스 농도가 횡 방향으로 증가하는 현상을 보인다. 그리고 누출 가스의 반경 5m 이내에 장애물이 존재 할 경우, 주위 벽면들로 인해 가스의 한계영역이 수직 방면으로 급격히 증가하는 현상이 나타난다.

누출 지점 주위 수직 벽면이 있을 경우, 장애물이 수평 방향으로의 유동을 제한하여 약 100초 이후 중 방향 및 횡 방향 누출 거리가 증가하였다. 특히, 중 방향 누출 거리에 대한 영향이 주요하며 장애물이 없는 경우보다 약 60% 더 크다.

장애물이 가스 분사류 경로에 있을 경우, 분사류가 수평 및 하부 방향으로 굴절 되어 장애물 주변으로 재순환된다. 따라서 누출 지점으로부터 1.8m 높이에서의 횡 방향 누출 거리가 장애물이 없을 경우에 비해 최대 8배까

지 증가하였다.

### References

- [1] S. Scholfield, Offshore QRA and the ALARP principle, "Reliability Engineering and System Safety", 61, 1-2, pp. 31-37, 1998.
- [2] E. S. Kooi, H. K. Spoelstra, and P. Haag, "QRA Method of Land-use Planning around Onshore Natural Gas Production and Processing Plants", Chemical Engineering Transactions, 31, pp. 67-72, 2013.
- [3] Y. Jo and B. J. Ahn, "A Method of Quantitative Risk Assessment for Transmission Pipeline Carrying Natural Gas", Journal of Hazardous Materials, 123, 1, pp. 1-12, 2005.
- [4] G. Dong, L. Xue, Y. Yang, "Evaluation of Hazard Range for the Natural Gas Jet Released from a High-pressure Pipeline: a Computational Parametric Study", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23, 4, pp. 522-530, 2010.
- [5] Y. C. Choi, J. J. Ahn, D. M. Ha, T. H. Kim and H. J. Oh, "A Study on Combustion Properties for Propane, Butane and LNG", Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 68-72, 2002.
- [6] R. Qi, D. Ng, B. R. Cormier and M. S. Mannan, "Numerical Simulations of LNG Vapor Dispersion in Brayton Fire Training Field Tests with ANSYS CFX", Journal of Hazardous Materials, 183, 1, pp. 51-61, 2010.
- [7] B. Sun, R. P. Utikar, V. K. Pareek, and K. Guo, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Liquefied Natural Gas Dispersion for Risk Assessment Strategies", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26, 1, pp. 117-128, 2013.
- [8] I. Yet-Pole, C. M. Shu, and C. H. Chong, "Applications of 3D QRA Technique to the Fire/Explosion Simulation and Hazard Mitigation within a Naphtha-cracking Plant", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22, 4, pp. 506-515, 2009.
- [9] J. R. Kim, S. M. Hwang and M. O. Yoon, "A Study on Damage Assessment Caused by Hydrogen Gas Leak in Tube Trailer Storage Facilities", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, 25, 6, pp. 32-38, 2011.
- [10] ANSYS FLUENT 13.0 User's Guide, 2014.
- [11] Y. Zhao, L. Xihong, and L. Jianho, Analysis on the Diffusion Hazards of Dynamic Leakage of Gas Pipeline, Reliability Engineering and System Safety, 92, 1, pp. 47-53, 2007.
- [12] M. J. Assael, and K. E. Kakosimos, "Fires, Explosion, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis", CRC Press, 2010.
- [13] 49 CFR Part 193, Liquefied Natural Gas Facilities: Federal Safety Standards.

**방 주 원**(Joo Won Bang)

[정회원]



- 2015년 8월 : 강원대학교 기계공학과 학사졸업
- 2015년 9월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계시스템엔지니어링 학과 석사과정

<관심분야>

전산유체역학, 열·유체

**이 성 혁**(Seong Hyuk Lee)

[정회원]



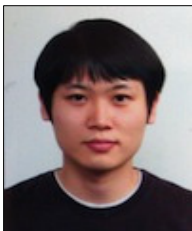
- 1995년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 석사 졸업
- 1999년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 박사 졸업
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 서울대학교 박사 후 과정
- 2013년 5월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

전산유체역학, 열전달 및 열공학

**성 건 혁**(Kun Hyuk Sung)

[정회원]



- 2008년 8월 : 중앙대학교 기계공학과 학사졸업
- 2013년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 석사졸업
- 2013년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

전산유체역학, 정보통신

**유 흥 선**(Hong Sun Ryou)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 항공공학과 석사졸업
- 1988년 7월 : Imperial College 항공공학 박사 졸업
- 1986년 3월 ~ 1987년 2월 : GEC Turbine 선임연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

전산유체역학, 유체역학