

지하 복합발전 플랜트 내에서의 가스 누출 및 확산 거동에 관한 수치해석 연구

방주원¹, 이성혁^{2*}

¹중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과, ²중앙대학교 기계공학과

Numerical Analysis of Gas Leakage and Diffusion Behavior in Underground Combined Cycle Power Plant

Joo Won Bang¹, Seong Hyuk Lee^{2*}

¹School of Mechanical System Engineering, Chung-Ang University

²School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

요약 본 연구에서는 상용코드인 Fluent(v.17.1)을 사용하여 수치해석을 진행하였으며, 지하복합발전 플랜트의 형상을 단순화하여 파공 크기 및 파공 위치에 따른 가스 누출에 관한 해석을 진행하였다. 누출 가스는 메탄으로 설정하였다. 파공 크기는 10 mm, 20 mm로 설정하였으며, 파공 위치는 파이프 엘보우 부근, 가스터빈 부근에서 가스가 누출될 경우로 가정하여, 총 4가지 Case에 대해 비교 및 분석을 진행하였다. 가스 누출을 분석하기 위해 연소 하한계의 개념을 바탕으로 누출 거리를 정의하여 종 방향, 횡 방향으로의 거리를 추정하여 정량적으로 분석하였다. 결과적으로 동일 위치에서 파공 크기에 따라 누출 거리가 최대 52.3 %의 차이를 보이며 종 방향의 누출 거리가 달라지는 것을 알 수 있었다. 그리고 동일 파공 크기일 때, 파공 위치에 따라 최대 34.8 %의 차이를 보이며 가스의 확산 경향이 달라지게 된다. 공기보다 가벼워 부력의 영향으로 상승하던 가스가 장애물로 인해 수평방향으로 확산이 제한되어 장애물이 없는 경우보다 재순환이 빨라지게 된다. 따라서 종 방향 누출거리와 횡 방향 누출거리가 파공 크기 및 파공 위치에 따라 다른 성장 거동을 보인다. 이와 같은 결과는 지하 복합발전 플랜트와 같은 밀폐공간에서 가스 센서의 위치 및 개수를 최적화 하는데 유용한 데이터가 될 것으로 보인다.

Abstract In this study, a numerical simulation was performed using commercial code Fluent(v.17.1). The underground Combined Cycle Power Plant (CCPP) was simplified to analyze the methane gas leakage with the crack size and position. In addition, extensive numerical simulations were carried out for different crack sizes from 10 mm to 20 mm. The crack position is the gas leakage, which is assumed to be near the pipe elbow and the gas turbine. A total of 4 cases were compared and analyzed. To analyze the gas leakage, the concept of the Lower Flammable Limit (LFL) was applied. The leakage distance was defined in the longitudinal direction, and the transverse direction was estimated and quantitatively analyzed. As a result, the leakage distance in the longitudinal direction varies by 52.3 % depending on the crack size at the same crack position. Moreover, the maximum difference was 34.8 % according to the crack position when the crack sizes are identical. As jet flow impacts on the obstacle and changes its direction, the recirculation flows are formed. These results are expected to provide useful data to optimize the location and number of gas detections in confined spaces, such as underground CCPP.

Keywords : Combined Cycle Power Plant, Computational Fluid Dynamics, Confined Space, Gas Leakage, Lower Flammable Limit

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

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

Tel: +82-2-823-5332 email: shlee89@cau.ac.kr

Received March 9, 2017

Revised April 5, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

복합발전 플랜트(Combined Cycle Power Plant, CCPP)는 LNG 연료를 사용하여 효율이 높고 공해가 적어 전 세계적으로 수요가 증가하고 있다. 하지만 HRSG(Heat Recovery Steam Generator), 스팀터빈, 가스터빈과 같은 대규모 시설들이 많기 때문에 건설 공간의 제약이 크다. 따라서 지하 공간에 복합발전 플랜트가 건설 중에 있다. 하지만, 공간의 특수성으로 가스 누출 및 화재 등과 같은 잠재적 위험요소를 가지고 있다. 지하 공간 내에서 가스 누출 및 화재 발생시, 심각한 인명 및 재산피해를 입기 때문에 지하 공간 내의 가스 누출에 따른 초기 유동 특성을 분석하여 정량적인 데이터를 기반으로 안전 시스템이 구축되어, 가스 누출 감지 센서의 개수 및 위치가 최적화 되어야 한다.

견고한 안전 시스템이 구축되기 위해서는 체계적인 평가 과정이 필요하다. 따라서 위험도 정량화 기법(Quantitative Risk Assessment, QRA)에 관한 연구가 현재 진행 중이다. QRA 방법은 시스템 정의, 위험성 정의, 사고 시나리오 정의, 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석 그리고 사고결과 정량화 순서로 진행되며, 총 5단계로 구성된다[1,2]. 최근 전산 유체 역학을 활용하여 위험 영역을 예측하는 연구가 진행 중에 있다. Yet-pole 등[3]은 석유 화학 플랜트의 나프타 누출에 관한 화재 및 폭발을 시뮬레이션을 수행 하였으며, 과압 및 온도를 이용하여 피해 범위를 정량화 하였다. Kang Li 등[4]은 이산화탄소가 누출 되었을 시, 파공 크기에 따라 달라지는 가스누출 형상을 가시화하였으며, 파공 크기에 따라 변화하는 누출 각도를 확인하였다. Kim 등[5]은 LNG 수송선 내 가스가 누출 되었을 시, 누출 특성을 연구하였으며, 가스 누출에 의한 피해를 예측하였다. 또한, 환기 시스템과 같은 위험 감소 방법을 제시하였다. Sun 등[6]은 주위기류가 가스 확산에 미치는 영향을 수치해석을 통해 분석하였으며, 바람에 따라 변화하는 피해 영역을 정의하였다. 그리고 실험과 비교를 통해 정확성을 입증하였다. Qi 등[7]은 압력챔버 내에서 가스 누출에 의한 피해를 수치해석기법을 이용하여 정량화하였다. 그리고 누출량이 증가함에 따라 변화하는 피해 범위를 분석하여, 장비 손상의 피해를 정리하였다. F. Rigas 등[8]은 화재 거동 특성을 수치해석으로 분석하였으며 실험 결과와 비교하여, 수치해석의 정확성을 검증

하였으며, 검증된 수치해석 방법을 바탕으로 시간이 지남에 따른 압력의 변화로 사고 피해를 예측하였다.

다양한 조건 및 환경에서의 가스 누출, 유동 특성에 관한 연구들이 많이 진행되어 왔다[9-10]. 그러나 밀폐 공간 내에서의 가스 누출, 유동 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 밀폐공간에서는 공기보다 밀도가 낮은 가스의 경우, 상승하며 확산하던 가스가 주변 벽에 의해 확산이 제한되어 다시 하단부로 내려오는 재순환 현상을 보인다. 이러한 밀폐공간의 특수성으로 인해 고압의 가스가 누출될 경우, 초기 가스 누출에 의한 화재 및 폭발의 위험성이 개방된 공간보다 높다. 따라서 초기 가스 누출 및 확산 거동에 관한 예측이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지하 복합발전 플랜트와 같은 밀폐공간 내에서 파공 크기 및 가스 누출 위치에 따른 누출 가스의 초기 유동 및 확산 특성에 대해 분석 하였다. 그리고 누출 가스의 연소 하한계를 이용해 가스 누출 거리를 계산하여 누출 분사류가 주위 장애물의 위치 및 파공 크기에 따라 달라지는 유동 특성을 분석하였다.

2. 수치해석 및 결과 분석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 가스 누출에 관한 유동 특성을 분석하기 위해 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 및 종 수송 방정식을 사용하였다. 식 (1)과 식(2)와 같이 연속 방정식과 운동량 방정식을 표현 가능하다:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} + (-\rho \bar{u}'_i u'_j) + \rho \bar{g}, \end{aligned} \quad (2)$$

이때, ρ 는 유체의 밀도를 의미하며, u 는 유체의 속도이다. P 는 유체의 압력이며, μ 는 유체의 점성이다. 한편, 종 수송방정식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_i}{P r_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j \bar{J}_j \right] + S_h, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_q) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_q) = -\nabla \cdot \bar{J}_q, \quad (4)$$

여기서 h_q , J_q 와 Y_q 는 각각 엔탈피, 확산 풍력스 그리고 q 종의 질량분율을 의미한다. 가스 누출 시 발생하는 난류를 고려하기 위해 난류모델은 식 (5)와 식 (6)과 같이 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하여 해석을 진행하였다:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \varepsilon. \quad (5)$$

$$\mu = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

여기서 h_q , J_q 와 Y_q 는 각각 엔탈피, 확산 풍력스 그리고 q 종의 질량분율을 의미한다. 가스 누출 시 발생하는 난류를 고려하기 위해 난류모델은 식 (5)와 식 (6)과 같이 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하여 해석을 진행하였다:

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

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

파공에서 누출되는 유량을 결정하기 위해 압축 기체가 누출될 때 질량유량에 대한 식(7)을 이용하였다 [12,13]. 파공특성에 관한 실험상수인 C_d 는 Round orifice의 평균값인 0.97을 사용하였다. 여기서, A_h 는 파공의 면적을 의미하며, W_g 와 P_0 는 누출 가스의 가스 분자량과 내부 압력을 의미한다[12,13]. 그리고 R 은 기체 상수, γ 는 정적비열에 대한 정압비열의 비율이다. 또한 K 는 가스 누출속도의 상수를 의미하며, 식 (8)과 같다.

2.2 형상 모델링 및 격자 독립성 테스트

Fig. 1(a)과 같이, 188 m × 158 m × 48 m로 구성된 대규모 복합발전 플랜트를 형상화 하였으며, 복합발전 플랜트의 주 설비인 가스 터빈, HRSG, 스팀 터빈 그리고 각종 파이프 등을 모델링 하였다. 식 (6)을 이용하여 파공 크기 10 mm, 20 mm로 설정하고 내부 압력과 가스 온도를 각각 4 MPa과 173.1 K으로 적용하여 질량유량을 구하였으며 계산된 질량유량 값은 0.4252, 1.7008 kg/s 이다.

Table. 1 과 같이 파공 크기, 파공 위치에 따라 총 4 Case의 시나리오로 구성하여 해석을 수행하였다. Case 1 및 Case 2의 경우 파이프 엘보우 지점에서 가스 누출이 되며, 파공 크기는 각각 10 mm, 20 mm로 설정하였다. 그리고 Case 3 및 Case 4의 경우에는 가스터빈 근처 파

이프에서 누출이 시작되며 파공 크기는 각각 10 mm, 20 mm로 가정하여 해석을 수행하였다. 초기 내부온도 300 K, 압력은 대기압 조건으로 설정하였으며, 누출 연료는 복합발전 플랜트의 주 연료인 LNG의 주성분인 메탄으로 설정하여 해석을 진행하였다. 시간에 따른 가스의 확산 경향을 분석하기 위해 30 초까지 과도 해석을 수행하였다.

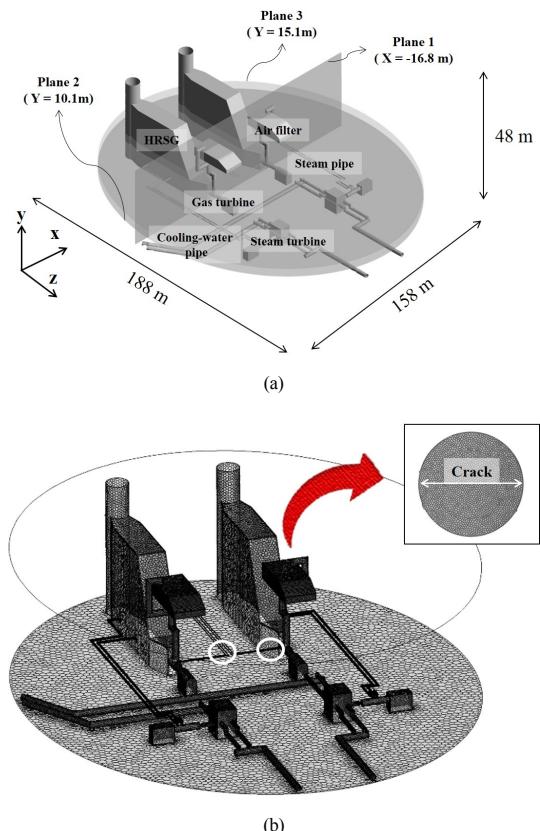


Fig. 1. (a) Schematic of Computational Domain, (b) Computational grid

Table 1. Boundary conditions

| | Crack position | Crack size |
|--------|----------------------|------------|
| Case 1 | Near the pipe elbow | 10 mm |
| Case 2 | Near the pipe elbow | 20 mm |
| Case 3 | Near the gas turbine | 10 mm |
| Case 4 | Near the gas turbine | 20 mm |

수치해석을 위해 상용 프로그램인 Fluent v17.1을 사용하여 Fig. 1(b) 과 같이 다면체 격자를 생성하였다. 본 해석의 Case 2와 동일하게 경계조건을 설정하여 격자

독립성 테스트를 수행하였다. Fig. 2과 같이 파공에서 10 m 떨어진 지점에서의 가스 누출 속도를 비교하여 오차율이 1.13 %로 가장 적은 210 여 만 개의 격자수를 선택하여 본 해석을 진행하였다.

2.3 수치해석 결과

본 연구에서는 연소 하한계(Lower Flammable Limit, LFL) 이상의 가스 농도 분포 영역은 화재 및 폭발의 가능성이 높아 한계영역으로 정의하였으며, 메탄의 LFL 값은 2.5 %이다[14]. Fig. 3은 누출 시간이 30 초일 때, 파공에서 누출되는 메탄의 확산 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)는 10 mm 파공이 파이프 엘보우에서 누출이 시작되었을 때이며, 누출 가스는 상승하여 상단부에 도달하기 직전이다. Fig. 3(b)는 20 mm 파공이 Case 1과 동일한 위치에서 누출이 시작될 때이며, 누출 가스가 상승하여 상단 벽면에 도달하여 횡 방향 유동으로 변하여 누출이 지속된다. 상단부에 도달한 가스는 Ceiling jet이 발생하여 옆 벽면을 따라 하단부로 내려오는 재순환 유동이 발생한다. Fig. 3(c)는 10 mm 파공이 가스터빈 근처 파이프에서 누출이 시작될 때이며, 상단부로 확산하던 가스의 유동이 장애물에 부딪혀, 횡 방향 유동으로 변하는 현상이 나타난다. Fig. 3(d)는 Case 3과 동일한 위치에서 누출이 시작되며, 누출 파공 크기는 20 mm이다. Case 3과 같이 위로 상승하던 누출 가스가 장애물을 만나 횡 방향 유동으로 유동의 방향이 변하며, 누출 가스의 양이 Case 3 보다 더욱 많이 때문에 횡 방향 유동으로 변한 가스의 양 또한 많다.

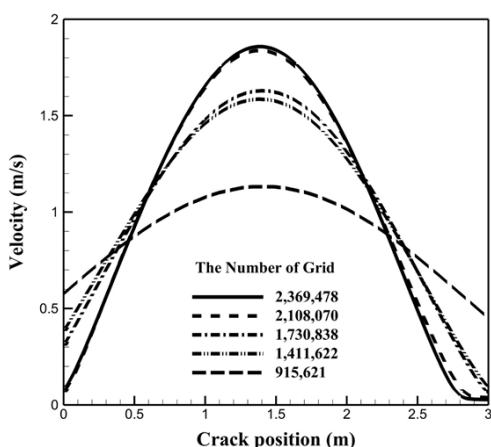


Fig. 2. Velocity according to the number of cell in grid

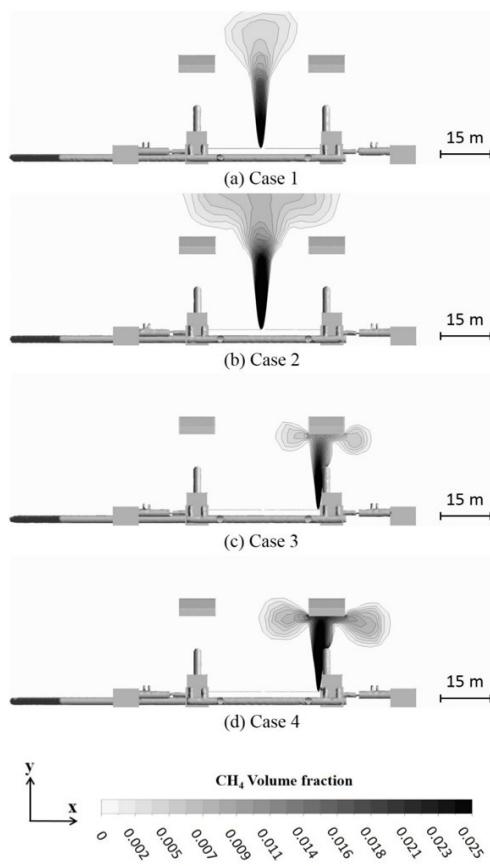
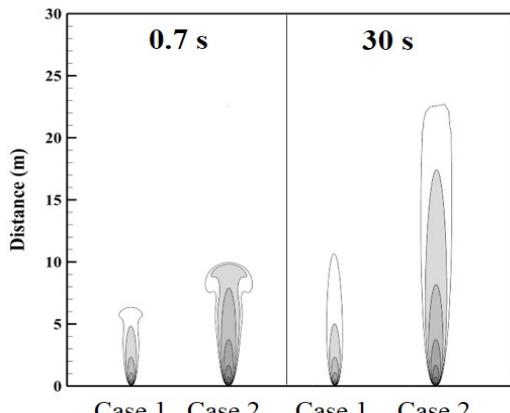


Fig. 3. The predicted volume fraction of leaking gas $t = 30$ s (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

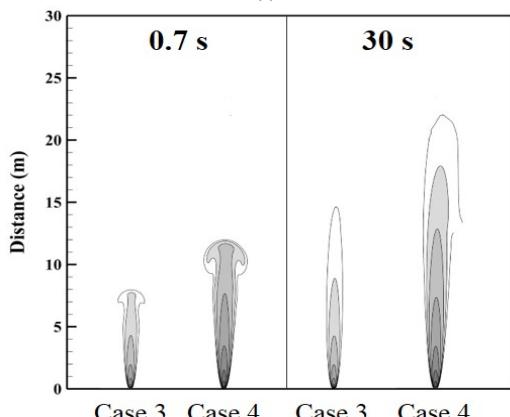
또한 Ceiling jet이 장애물에 의해 발생하여 재순환 영역이 Case 1,2에 비해 빨리 발생하는 현상이 나타난다. Fig. 4는 가연 한계 이상의 영역에 집중하기 위해 시간에 따른 가연한계 이상의 농도 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 Case 1과 Case 2, Fig. 4(b)는 Case 3과 Case 4를 누출된 직후 0.7 초, 30 초일 때 비교한 그림이다.

Case 1의 경우 시간이 지남에 따른 가연한계 변화량은 약 40.3 %의 차이를 보이며, Case 2의 경우에는 55.6 %의 차이를 보인다. 파공 크기에 따라서 누출 거리의 변화는 커진다. 파공 크기가 커짐에 따라 누출되는 양 또한 달라져, 유량의 차이로 인한 변화량이다. Case 3의 경우 시간이 지남에 따른 가연한계 영역의 변화량은 55.6 %이며, Case 4의 경우는 46.4 %의 차이를 보인다. Case 1과 Case 2에 비해 성장률의 차이를 보이는데, 분사류 주위 장애물의 영향으로 인한 빠른 재순환으로 인해 초기 가스 누출 시 가연한계 영역의 성장이 더 빠르게 진

행되기 때문이다. 또한, Case 2와 Case 4가 비교적 동일한 누출 거리로 나타난다. Case 4에서는 시간이 지남에 따라 누출 영역에 존재하는 파이프에 의해 상승하던 가스의 유동 방향에 영향이 생겨, 가스의 누출거리가 성장하지 못한다. 또한, 누출되던 가스는 파이프 방향으로 기울어진다.



(a)



(b)

CH₄ Volume fraction

Fig. 4. Gas leakage for different crack sizes and positions at plane 1 (a) 0.7 s (b) 30 s

본 연구에서는 연소 하한계 영역 내에서의 위험 영역을 분석하기 위해 Fig. 5와 같이, 종 단면, 횡 단면의 누출거리를 $D_{L,L}$, $D_{L,T}$ 로 구분하여 시간이 지남에 따라 성장하는 누출 거리를 정의하였다. Fig. 6는 시간이 지남에

따른 종 방향 누출 거리($D_{L,L}$)를 나타낸 그래프이다. 5초 까지 $D_{L,L}$ 을 확인한 결과, 2.5초 이내에 모든 파공에서 급격하게 누출 거리가 증가하며, 이후에는 $D_{L,L}$ 이 증가하지 않는다. Case 1과 Case 3를 비교해볼 때, $D_{L,L}$ 은 최대 34.8% 차이가 나며, 누출 분사류가 누출 주위의 장애물에 부딪친 후, 종 방향으로 진행되던 누출가스가 수평방향으로 누출이 제한되어 진행방향이 바뀌어 빠른 재순환 영역이 형성된다. Case 2와 Case 4에서는 유사한 $D_{L,L}$ 의 성장 경향이 나타난다. 초반에 급격하게 성장하던 $D_{L,L}$ 이 분사류 주위의 장애물 영향으로 Case 4가 Case 2에 비해 더욱 $D_{L,L}$ 이 증가하여야 하지만, 파이프 위치의 영향으로 누출되던 가스의 유동 방향이 변하여 $D_{L,L}$ 이 더 이상 증가하지 않고 Case 2와 동일한 $D_{L,L}$ 이 나타난다. Fig. 7은 시간에 따라 변하는 횡 방향 누출 거리($D_{L,T}$)를 나타낸 그래프이다.

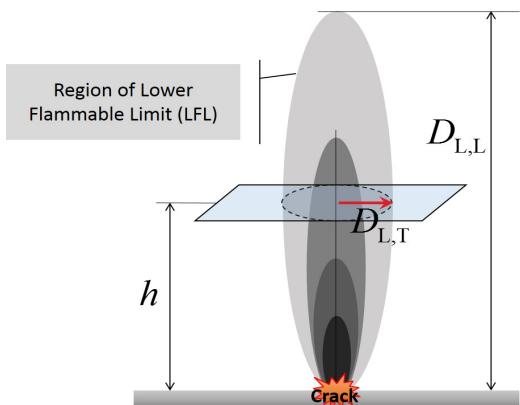


Fig. 5. Definition of leakage distance

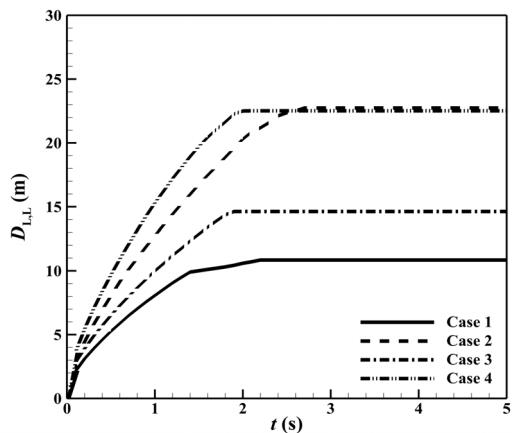


Fig. 6. Time varying leakage distance ($D_{L,L}$) for different crack sizes and crack positions at plane 1; during 5 s

모든 Case에서 가스 누출은 1.5 초 이내로 급격히 이루어진다. Case 1의 경우 높이에 따른 $D_{L,T}$ 는 약 27.5 %의 차이를 보이며, Plane 3의 $D_{L,T}$ 가 더 크게 나타난다. 장애물이 분사류 주위에 존재하지 않아 부력 효과에 의해 가스가 상부공간으로 확산되는 현상이 나타난다. 따라서, 분사류는 촛불 모양으로 형성되어 누출이 되며, Plane 3의 영역이 더 크게 나타난다. 하지만, Case 3의 경우, 누출 높이에 따른 $D_{L,T}$ 는 약 0.4 %로 근소한 차이를 보인다. Case 1과 비교해볼 때, 분사류가 장애물에 부딪혀 장애물의 하부 공간에서 재순환 유동이 발생하여 초기에 지속적으로 성장하는 현상이 나타난다.

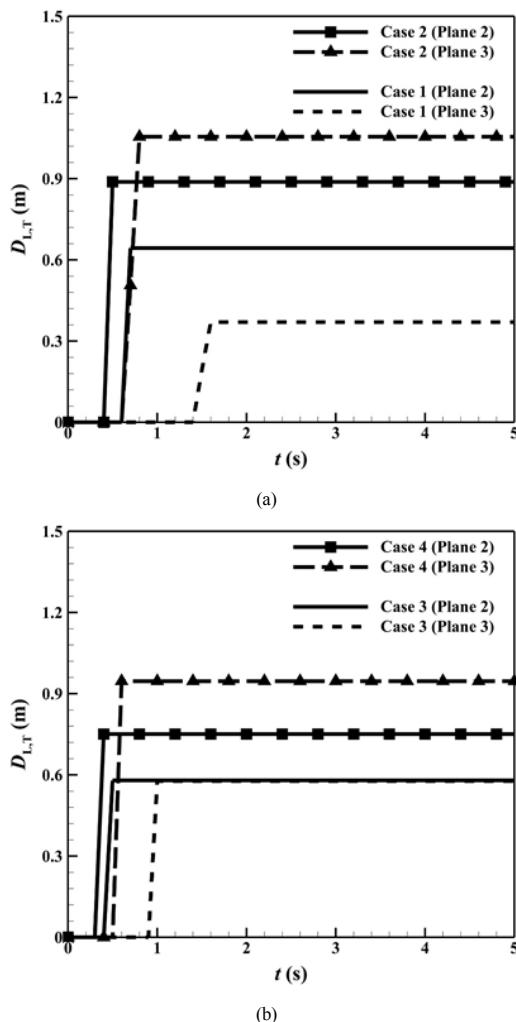


Fig. 7. Time varying leakage distance ($D_{L,T}$) for different crack sizes and crack positions; during 5 s

따라서 분사류는 Case 1에 비해 촛불 모양이 제대로 형성이 되지 않아, $D_{L,T}$ 는 근소한 차이를 보인다. Case 4는 분사류 주위 파이프의 영향 및 장애물의 영향으로 가스의 유동이 변하여 성장이 제한된다. $D_{L,T}$ 또한 일정 거리 이상으로 증가하지 않으며, Case 2와 동일한 경향을 보인다.

3. 결론

본 연구에서는 지하 복합발전 플랜트 내에서의 파공 크기 및 파공 위치가 누출 가스 분사류의 초기 유동과 확산 거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 누출 가스 경로에 장애물이 존재하지 않는 경우, 시간이 지남에 따라 가연한계 영역의 변화는 파공 크기에 따라 누출 거리가 달라지며, 종 방향 누출 거리의 차이는 최대 52.3 %의 차이가 보인다. 그리고 가스 분사 경로에 장애물이 있는 경우, 파공 크기에 따른 종 방향 누출 거리의 차이는 최대 35 %이다.
- 2) 장애물이 가스 분사류 주위에 있을 경우, 분사류가 수평 방향 및 하부 방향으로 굴절되어 빠른 재순환 현상이 나타난다. 따라서 10 mm 파공의 경우, 종 방향 누출 거리가 장애물이 존재하지 않을 경우보다 장애물이 존재 할 경우 최대 34.8 % 더 크다.
- 3) 가스 분사류 경로에 파이프가 존재할 경우, 파이프의 영향으로 가스의 유동이 변화하여 가연한계 영역 이상의 누출 거리가 더 이상 성장하지 못한다. 따라서, 동일 파공 크기일 때 가스 분사류 주위에 파이프가 존재하지 않는 경우와 종 방향 누출 거리의 차이는 1 %이다.

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.
DOI: <http://doi.org/10.3992/1000-0992.155556>

- [3] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.04.002>
- [4] K. Li et al. "An experimental investigation of supercritical CO₂ accidental release from a pressurized pipeline", *Journal of supercritical Fluids*, 107, pp. 298-306, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.09.024>
- [5] K. P. Kim, H. K. Kang, C. H. Choung and J. H. Park, "On the application of CFD codes for natural gas dispersion and explosion in gas filled ship", *JKSME*, 35, 7, pp. 946-956, 2011.
- [6] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.002>
- [7] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.090>
- [8] F. Rigas, S. Sklavounos, "Simulation of coyote series trials - part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions", *Chemical Engineering Science*, 61, pp. 1434-1443, 2006.
- [9] B. Sun, K. Guo, and V. K. Pareek, "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, pp. 92-102, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.02.003>
- [10] S. Zhang, X. Ni, M. Zhao, J. Feng, and R. Zhang, "Numerical simulation of wood crib fire behavior in a confined space using cone calorimeter data", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, pp. 2291-2303, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4291-4>
- [11] ANSYS FLUENT Inc., "FLUENT 14.0 User's Guide", 2014.
- [12] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.010>
- [13] M. J. Assael, and K. E. Kakosimos, "Fires, explosion, and toxic gas dispersions: Effects calculation and risk analysis", CRC Press, 31, 3, 2010.
- [14] 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