화원 위치에 따른 지하 복합 발전 플랜트 내 열유동 특성 연구

성건혁¹, 방주원², 이소영¹, 유홍선¹, 이성혁^{1*} ¹중앙대학교 기계공학과, ²중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과

Characteristics of Thermal and Fluid Flows for Different Fire Locations in Underground Combined Cycle Power Plant

Kun Hyuk Sung¹, Joo Won Bang², Soyeong Lee¹, Hong Sun Ryou¹, Seong Hyuk Lee^{1*} ¹School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University ²School of Mechanical System Engineering, Chung-Ang University

요 약 본 연구에서는 Fire Dynamics Simulation (FDS)를 이용하여 화재 기류 전파 경로 상에 플랜트 설비 유무가 공간 내 열유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 화원 위치에 따른 지하 복합 발전 플랜트 내 화재 해석을 수행하였다. 화원의 크기는 10 MW이며, 화원 상부의 장애물(설비)의 유무에 따라 화원 위치가 천장 및 화원 상부에서의 열 기류 선단의 전파 특성을 미치는 영향을 정량적으로 비교분석하였다. 결과로서, 화원 상부에 장애물이 있을 경우, 화재 기류가 화원 상부 천장 에 도달하는 시간이 장애물이 없을 때에 비해 약 5 배가량 증가하였다. 화원 상부 천장 벽면의 천장 기류 시작 지점으로부터 거리에 따른 각 지점에서 열 기류 선단의 전파 시간의 평균적으로 장애물이 없는 경우에 비해 약 70% 가량 증가하였으며, 특히 10 m 지점에서는 4 배 가까이 증가하였다. 이는 장애물이 화원으로부터 발생하는 수직 열기류의 흐름을 방해하고, 장애 물 뒤 쪽에 불안정한 후류가 형성되었기 때문이다. 따라서 지하복합 발전 플랜트 내 피난 및 재난 관리의 초기 대응 목적의 화재 감지 설비 시스템 설계 시 화재 시나리오에 따른 열유동 분석이 중요할 것으로 판단된다.

Abstract The present study numerically investigates the effect of obstacles located in the trajectory of fire plume flow on heat flow characteristics by using Fire Dynamics Simulation (FDS) software in an underground combined cycle power plant (CCPP). Fire size is taken as 10 MW and two different locations of fire source are selected depending on the presence of an obstacle. As the results, when the obstacle is in the trajectory of fire plume, hot plume arrives at the ceiling about 5 times slower in the upper of the fire in comparison to the results without obstacle. In addition, the average propagation time of ceiling jet increases by about 70 % with the distance from the ceiling in the upper of the fire, and it increases mainly about 4 times at the distance of 10 m. Consequently, it is noted that the analysis of heat flow characteristics in the underground CCPP considering fire scenarios is essential to develop the fire detection system for initial response on evacuation and disaster management.

Keywords : Ceiling jet, FDS, Fire scenario, Hot plume, Underground Combined Cycle Power Plant

1. 서론

최근 천연가스의 가격 하락으로 인하여 효율이 높은 복합발전 플랜트 (Combined Cycle Power Plant, CCPP) 의 수요가 전 세계적으로 증가하고 있다. 하지만 복합발 전 플랜트는 가스 터빈, 배열 회수 보일러 (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) 등과 같은 대규모 설비들로 인하여 건설 공간의 많은 제약이 따른다. 지하 복합발전 플랜트의 경우 밀폐공간의 특수성으로 인해 가

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과입니다 (No. 2014 1010101850). *Corresponding Author : Seong Hyuk Lee(Chung-Ang Univ.) Tel: +82-2-820-5254 email: shlee89@cau.ac.kr Received March 23, 2017 Revised April 20, 2017 Accepted May 12, 2017 Published May 31, 2017



Fig. 1. Computational domain (a) Iso-view of the domain (b) Locations of fire and major appliances

스 누출에 의한 폭발 및 화재의 위험성이 높다. 따라서 밀폐공간내의 화재특성을 분석하고, 정량적인 데이터를 기반으로 안전 시스템을 확보하여야 한다. 안전 시스템 이 구축되기 위해서는 위험도 정량화 기법(Quantitative Risk Assessment, ORA)에 대한 연구가 필요하다. ORA 는 시스템 정의, 위험성 정의, 사고시나리오 정의, 전산 유체역학 해석 그리고 사고결과 정량화 순으로 정의된다 [1,2]. 최근 전산 유체 역학을 활용한 연구가 진행 중에 있다. Yet-pole 등[3]은 석유화학 공정 플랜트에서 화학 연료의 누출에 의한 화재 및 폭발을 시뮬레이션을 수행 하였으며, 과압 및 온도를 활용하여 피해 범위를 정량화 하였다. Kim 등[4]은 LNG 수송선 내에서 가스의 거동 을 연구하였으며, 누출에 의한 피해예측을 정량적으로 분석하였다. 또한, 위험 감소 방법으로 환기 시스템을 제 안하였다. Choi 등[5]은 LNG와 LPG의 화재의 거동 및 특성을 정의하여, 조건 변함에 따른 피해 평가인자를 제 안하였다. Kim 등[6]은 tube trailer에서 가스 누출에 의 한 피해예측에 관한 연구를 진행 하였으며, 파공 크기 및 압력 등에 의해 가스 폭발의 피해 범위를 산출하였으며,

사고발생 시 피해를 최소화하기 위한 방안을 제안하였 다. F. Rigas 등[7]은 화재 특성을 수치해석 방법을 바탕 으로 분석하였으며, 시간에 따른 압력 변화로 사고 피해 를 예측하였다. 그러나 대부분의 연구들이 열린 공간에 서의 누출 및 폭발에 초점이 맞추어져 있어 밀폐 공간 내에서의 화재 거동 특성에 관한 연구는 부족한 실정이 다. 밀폐 공간 내 화재가 발생할 경우 천장 기류(Ceiling jet)가 공간 전체를 재순환 하는 와류를 형성하여 화재 특성이나 화원 위치가 공간 내 열적 분포에 영향을 줄 수 있다. 또한, 지하 복합 플랜트와 같은 대 공간 내의 화재 기류 전과 특성 분석은 초기 화재 대응 및 감지 설 비 설계에 있어 매우 중요하다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델 및 지배방정식

본 연구에서는 미국 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발한 화재 해석 수치 해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator, Ver. 5.0)을 사용하였다. FDS는 연기 및 유동 가스의 유동에 대해 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 수치해석을 수행 한다. 난류 유동 해석은 LES(Large Eddy Simulation)모 델을 적용하였으며 연소모델은 혼합분율(Mixture Fraction) 모델을 적용하였다.

2.2 모델링 및 수치해석 조건

본 연구에서는 실제 건설 중인 지하 복합 발전 플랜트 공간을 간략화하여 모델링 하였으며, 해석 공간의 크기 는 158 m × 188 m × 48 m 이다. 화재 사고 영향 평가 에서 중요할 것으로 판단되는 HRSG, 터빈, generator, fan room과 같은 주요 설비들을 제외한 pipe line 및 기 타 설비는 모델링 과정에서 제외하였다.

해석 격자 구성 시 해석 공간 내 설비의 형상이 매우 복잡한 반면, FDS는 직교(orthogonal) 격자구성만 가능 하여 열 기류의 속도와 온도가 가장 높은 화원 위쪽의 화재 기류 모델링 시 요구되는 최소 격자 크기를 기준으 로 전체 격자를 구성하였다. 화재 기류 모델링의 위해 요 구되는 최소 격자의 크기는 화원의 열 방출률(heat release rate, *D*)을 고려한 특성 화염 직경(characteristics fire diameter, *D**)을 통해 결정 된다 [8].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty}c_p T_{\infty}\sqrt{g}}\right)^{2/5} \tag{1}$$

여기서 ρ_{∞} , c_p , T_{∞} 는 각각 표준상태(20 °C, 1 atm)에 서의 주위 공기에 대한 밀도, 비열, 온도를 나타낸다. 일 반적으로 $0.05 < \overline{\Delta}/D^* < 0.10$ 의 격자 크기에서 타당한 수치 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으며 [9], 여기서 $\overline{\Delta}$ 는 평균 격자 크기를 의미한다. 본 연구 에서는 모든 격자의 크기는 1 m × 1 m × 1 m로 동일하 게 구성하여 $\overline{\Delta}$ 는 1 m 이며, 화원의 최대 열 방출률을 고려한 D^* 는 16.18 m이고 최종적으로 계산된 $\overline{\Delta}/D^*$ 값은 0.062이다. 따라서 해석 공간에 설정된 격자 크기는 특성 화염 직경을 고려하였을 때 타당한 것 으로 판단된다.



Fig. 2. locations of data acquisition.

복합 발전 플랜트 내에서 연료인 메탄(Methane, CH4) 가스가 누출 직후 연소되는 것으로 가정하였으며, 화재 시나리오가 화재 기류 특성에 미치는 여향을 분석하기 위해 화원의 최대 열 방출률 및 화원의 위치에 따라 Table 1에 나타낸 바와 같이 수치해석 case를 선정하였 다. 화재 성장 속도는 ultra-fast 조건을 적용하였으며, 화 재 발생 면의 크기는 최소 격자 크기와 동일한 1 m × 1 m이다. 지하 공간 벽면을 포함한 내부 설비의 모든 벽 면에는 단열(adiabatic) 및 점착(no-slip) 경계 조건을 적 용하였다. 초기 조건은 20 ℃, 1 기압이며, 총 해석 시간 은 200 초이다.

Table 1.	Fire	condition.
----------	------	------------

Case No.	Maximum HRR	Location
1	10 MW	Fuel pipe line
2	10 MW	Generator

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 지하 공간 내의 전체적인 열적 분포 특 성을 분석하기 위해 천장에서 1 m 떨어진 지점의 XY-plane 과 각 화원의 중심을 지나는 ZY-plane에서의 시간에 따른 온도 분포를 분석 하였다. 또한, 화원으로 부터 발생하는 열 기류의 높이 방향과 천장 벽면에 형성 되는 연기 전파 정도를 총 7 개 지점에서의 급격한 온도 상승 시점을 통해 분석하였다. Fig. 2에 표시 된 Z39, Z47 지점은 각 화원의 중심의 수직선상의 위치하며 각 각 천장 벽면으로부터 9 m, 1 m씩 떨어져 있다. D10 ~ D50은 XY-plane에 위치하며 화원의 중심선으로부터 각 각 10m 간격으로 떨어져 있다.Fig. 3은 각 화원 별 위치 에서 화원의 중심을 지나는 ZX-plane과 천장으로부터 1 m 떨어진 XY-plane에서의 시간에 따른 열적 분포를 보 여준다. Case 1의 경우, 발화 후 50 초까지는 화원으로 부터 발생한 열 기류가 천장까지 곧게 도달한 이후 천장 벽면을 따라 천장 제트를 형성하여 공간 전체로 퍼져 나 간다. 100 초 이후부터는 지하 공간의 특성상 퍼져 나간 기류가 다시 중앙으로 모아지며 커다란 와류를 형성하여 화원 근처의 열 기류가 불안정해지며 화원 근처에서의 온도가 초기에 비해 상대적으로 낮아진다. 반면에, case 2의 경우에는 화원과 천장 사이에 있는 fan room으로 인해 열 기류가 천장으로까지 직접적으로 도달하지 못하 고 fan room에 부딪힌 후 fan room 뒤쪽으로 넓은 후류 를 형성 한다. 이로 인해, case 1에 비해 화재 초기부터 fan room의 뒤쪽에서 상대적으로 넓은 영역에 걸쳐 온 도 상승이 나타난다. 대부분의 화재 감지 설비가 설치되 는 천장 벽면 주위의 온도 분포를 보여주는 Fig. 3(b)를 보면 case 2의 경우, fan room으로 인해 직접적으로 열 기류가 도달하지 못해 100 초 전후로 전체 천장으로 연 기가 퍼진 반면, case 1의 경우에는 화재 초기에 화원의 수직 중심선 상에 위치한 천장의 온도가 집중적으로 상 승하며 50 초 이후에는 연기가 천장 전체로 퍼져 나간 다. 결과적으로 화원으로부터의 열 기류 제트의 흐름 선



Fig. 3. Distribution of temperature (a) at ZX-plane across the center of each fire source (b) at XY-plane of Z=47 m.

상에 있는 fan room이 직접적으로 열 기류의 흐름을 방 해하여 천장 벽면의 온도 상승률을 감소시킨다.

Case 2의 경우에는 fan room이 천장으로 가는 열 기 류의 흐름을 막아 천장 근처에서의 기류 온도가 case 1 에 비해 현저히 낮아지며, 이로 인해 발화 후 천장에서의 연기 감지 지연 시간이 크게 증가 할 수 있다. Fig. 4는 화원 위치에 따른 화원의 수직 방향 위쪽 천장으로부터 9 m(Z39)와 1 m(Z47) 떨어진 지점에서의 발화 후 온도 변화 추이를 보여준다. 본 연구에서 열 기류의 도달 시점 은 해당 지점의 시간에 따른 온도 변화 곡선에서 초기온 도에서 온도가 급격하게 상승하는 시간으로 정의하였다. Case 1의 경우 열 기류가 천장 벽면에 발화 후 7 초 후 에 도달하였으나 case 2의 경우에는 34 초가 걸린다. 또 한, case 1의 경우 열 기류가 화원 위치로부터 순차적으 로 퍼져 나가 11 초에 최대 온도인 67 °C까지 온도가 상 승한 이후 지속적으로 감소한다. 이는 앞서 언급한 전체 공간으로 연기가 퍼졌다가 다시 모이면서 천장 부근으로 내부의 차가운 공기가 같이 섞이기 때문이다. 반면에 case 2의 경우 fan room 뒤쪽으로 후류로부터 발생한 불 안정한 유동으로 인해 천장 근처의 기류 온도가 서서히 상승하는 경향을 보인다.



Fig. 4. Evolution of temperature at two heights of Z=39 m and Z=47 m aligned with the vertical line of each fire location.

Fig. 5는 시간에 따른 각 화원위치를 기준으로 한 D10, D30, D50 지점에서의 온도 변화를 보여 준다. 100 초 이후에는 화원 위치 및 분석 지점에 관계없이 모두 25 ~ 30 °C내에서 온도가 유지 되는 반면에, 화재 초기 에는 화원의 중심선 부근으로 다가갈수록 case 1의 온도 가 상대적으로 높게 나타난다. 이는 case2의 경우 fan room에 의해 불안정해진 화원으로부터의 상승기류가 주 위 공기와 혼합되며 퍼져나가며 넓은 범위에 걸쳐 온도 상승이 발생하기 때문이다. 이러한 열 유동 특성은 지하 공간 내 화재 감지 설비의 최초 감지 시간에 영향을 줄 수 있다. Fig. 6는 D10 ~ D50 지점에서의 열 기류 도달 시간을 보여준다. Case 1의 경우 거리가 증가함에 따라 도달시간이 선형적으로 증가하지만 case 2의 경우에는 30 m 이내 영역이 33 초 전후로 거의 동시에 열 기류가 도달한 이후 case 1과 같이 선형적인 증가 추이가 나타 난다. 특히, 화재 발생 여부의 초기 감지와 밀접한 관련 이 있는 10 m 지점에서의 경우 fan room에 의해 열 기 류 도달 시간이 약 4배 가까이 지연 되며, 30 m 지점 이 후에서는 case 1에 비해 도달 시간이 평균적으로 약 70% 가량 증가한다. 따라서 열 기류를 이용한 화재 감 지 설비 시스템 설계 시 초기 대응 단계에서 장애물이 화원으로부터의 상승 기류 유동 특성에 미치는 영향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.



Fig. 5. Evolution of temperature at the points of D10 D30, D50.



Fig. 6. Arrival time of hot plume with distance from the center of fire source.

4. 결론

본 연구에서는 화원 위치에 따른 지하 복합 발전 플랜 트 내 화재 해석을 수행하고, 지하 공간의 전체적인 열적 분포 파악하고 천장 및 화원 상부에서의 열 기류 선단의 전파 특성을 정량적으로 분석하였다.

- 화원 상부에 장애물이 있을 경우, 화재 기류가 화 원 상부 천장에 도달하는 시간이 장애물이 없을 때 에 비해 약 5 배가량 증가하였다.
- 화원 상부 천장 벽면의 천장 기류 시작 지점으로부
 터 거리에 따른 각 지점에서 열 기류 선단의 전파

시간의 평균적으로 장애물이 없는 경우에 비해 약 70% 가량 증가하였으며, 특히 10 m 지점에서는 4 배 가까이 증가하였다.

결론적으로, 지하복합 발전 플랜트 내 피난 및 재난 관리의 초기 대응 목적의 화재 감지 설비 시스템 설계 시 화재 시나리오에 따른 열유동 분석이 중요할 것으로 판단된다.

References

- S. Scholfield, "Offshore QRA and the ALARP principle", Reliability Engineering and System Safety, 61, pp. 31-37, 1998.
 DOI: https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00062-8
- [2] E. S. Kooi, H. K. Spoelastra, 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] 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, pp. 506-515, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.04.002
- [4] 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 fulled ship", JKOSME, vol. 35, no. 7, pp. 946-956, 2011.
- [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] 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.
- [7] F. Rigas and 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.
- [8] A. Bounagui, N. Benichou, C. McCarteny, A. Kashef, "Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses", 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing Virtual Reality, 2003.
- [9] K. B. McGrattan, F. Jason, G. P. Forney, H. R. Baum, S. Hoskikka, "Improved radiation and combustion routines for a large eddy simulation fire model", Fire Safety Science, 7, pp. 827-883, 2003. DOI: https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.7-827

성 건 혁(Kun Hyuk Sung)

[정회원]



- 2008년 8월 : 중앙대학교 기계공 학과 학사졸업
 20013년 2월 : 중앙대학교 기계공
- 20015년 2월 : 중중대학교 기세종 학과 석사졸업
- •20013년 3월 ~ 현재 : 중앙대학 교 기계공학과 박사과정

<관심분야> 전산유체역학, 열·유체역학

방 주 원(Joo Won Bang)

[정회원]

- •2015년 8월 : 강원대학교 기계공 학과 학사졸업
- •2015년 9월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계시스템엔지니어링 학과 석사 과정

<관심분야> 전산유체역학, 열·유체역학

이 소 영(Soyeong Lee)

[정회원]



- •2015년 2월 : 중앙대학교 기계공 학과 학사졸업
- •2016년 2월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 석사과정
- <관심분야> 전산유체역학, 열·유체역학

유 홍 선(Hong Sun Ryou) [정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 항공공 학과 석사졸업
- •1988년 7월 : Imperial College 항공공학 박사 졸업
- 1996년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 교수

<관심분야> 전산유체역학, 유체역학

이 성 혁(Seong Hyuk Lee)

[정회원]



- •1995년 2월 : 중앙대학교 기계공 학과 석사 졸업
- •1999년 2월 : 중앙대학교 기계공 학과 박사 졸업
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 서울 대학교 박사 후 과정
- •2013년 5월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 교수

<관심분야> 전산유체역학, 열전달