열매유 보일러 내부화재에 따른 온도 및 속도분포 해석

김엽래[†] · 손봉세*

경민대학교 소방행정과, *가천대학교 소방방재학과

Temperature and Flow Velocity Analysis for Fire in Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler

Yeob-Rae Kim[†] · Bong-Sei Son*

Dept. of Fire Protection Administration, Kyungmin Univ.

*Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Gachon Univ.

(Received May 7, 2013; Revised October 10, 2013; Accepted October 11, 2013)

요 약

열매유(Synthetic Heat Transfer Fluid)의 가열현상으로 인하여 보일러에서 화재가 발생한 경우에 대하여 컴퓨터 수치 해석을 통한 1, 2, 3차 패스 및 연소대의 온도 및 속도분포를 파악하였다. 보일러의 인버터의 고장으로 인하여 보일러 내부의 유동이 다소 불안정한 상태에서 운전이 지속되면서 화염의 유동과 속도가 불안정하게 작동된 것으로 판단된다. 열매유의 누유현상은 화재초기에 약 120 kg/min로 분출하면서 기화되었고, 또한 화염은 2차 패스와 3차 패스까지 열전달 현상이 확대되었다. 2차 패스에서의 최고온도는 1,059 °C, 3차 패스의 최고온도는 1,007 °C이고, 3차 패스 아래쪽에서는 온도가 767 °C인 것으로 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서 알 수 있었다. 특히, 연소대는 1차 패스 균열부위에서 열매유가 분출되면서 턴테이블 위로 쌓였으며, 연소대 하부에서 온도는 플래시오버 현상에 의하여 183 °C까지 올라갔다. 따라서 연소대 내부의 온도는 1,200 °C 이상으로 예측되었으며, 연소대의 온도는 순간적으로 여러 차례 최고점의 온도까지 도달되어 연소대에서 여러 차례 폭발현상이 발생한 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

The fire took place in the synthetic heat transfer fluid boiler. This study uses simulation to investigate the first, second and third passes and the temperature in the fire burner. The boiler's internal fluid is more or less unsteady due to the out of order inverter. As the operation continues, the flame's flow and speed are unsteady. The synthetic heat transfer fluid leak spouted about 120 kg/min in the form of vapor in the early period of the fire. The flame extended to the second and third passes. The highest temperature of the second and third pass is 1059 °C and 1007 °C, respectively. The simulation shows that the temperature is 767 °C in the low part of the third pass. The synthetic heat transfer fluid spouted through the cracked part of the fire box in the first pass and accumulated on the turn table. The temperature rises to 183 °C in the low part of the burner. Therefore, it is expected that the temperature of the interior of the fire box is above 1200 °C. The temperature of the burner rises to a maximum level several times in a short period. On account of that, several explosions occur in the fire burner.

Keywords : Synthetic heat transfer fluid, Pass, Fire burner, Inverter, Explosion

1. 서 론

Medium Density Fiberboard(MDF) 제조공정에 필요한 열매유(synthetic heat transfer fluid)를 가열하는 보일러에서 화재가 발생하였다. 화재가 발생한 1차 패스 연소대 위쪽 14단 부근에서 열매유가 방출되었다. 화재확산으로 인한 데이터를 토대로 화재 시뮬레이션용 ANSYS-CFX^(1,2)를 이용하여 재현하고 화재 모델링 해석 및 분석을 통해 화재온도 및 속도분포를 예측하였다.

해석결과 1차, 2차, 3차 패스의 온도 영향이 화재 사고로 설비의 운전 및 소재에 대한 피해를 규정하고, 이론에 의한 과학적인 정밀 조사를 실시하여 향후의 안전한 운전을 위한 제안을 하고자 한다.

2. 열매유 보일러 구조와 화재진행 과정

연소대 상부에는 수직 원통형인 열매유 보일러의 1차 패스가 위치하고, 1차 패스를 지난 후에 4각 수평형의 2차

[†]Corresponding Author, E-Mail: kyrae@kyungmin.ac.kr
TEL: +82-10-3757-7757, FAX: +82-31-828-7950

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.5.19>

패스와 3중 원통형 코일의 3차 패스가 직각방향으로 차례로 통과하면서 열매유에 열교환을 하고 있다.

화재가 발생한 보일러는 인버터(inverter)의 고장으로 수동 작동되는 상황이었으며, 보일러는 불안정한 상태에서 운전이 지속되었다. 연료의 공급과 내부압력의 변화가 인버터의 작동 때보다 심한 편차를 보이기도 하였다. 즉, 인버터 고장으로 인하여 비정상상태(unsteady-state)로 운전이 계속되어 정상상태의 운전이 힘든 상황이 발생하는 현상이 나타났다. 연소대의 온도 측정 장치는 연소대 하부에 위치하고 있어 1차 패스 균열부위에서 열매유가 분출되면서 연소대 턴테이블(turn table) 위로 누유 되어 화재가 확산되었다. 따라서 화재현상은 연소대 위치로 열매유가 쌓

Figure 1. Fire burner.

Figure 2. Boiler's schematic diagram.

이면서 화재확산은 표면화염 확산, 혼소상태의 화재성장, 예혼합 화염전파에서의 화구(fire ball) 등을 포함하는 연소과정으로 화재가 진행을 적용하였다.

3. CFD 해석 및 모델링

3.1 CFD 해석

Computational Fluid Dynamics(CFD)해석은 여러 단계를 나누어 진행된다. 먼저 AutoCAD를 통해 모델링을 한 후 격자형성 작업을 거친다. 그리고 격자(mesh)가 형성된 모델에 경계조건을 설정하여 해석하게 된다.

최종적으로 결과확인 과정에서 원하는 결과를 얻지 못하면 Figure 4와 같이 다시 경계조건에서 결과에 맞는 데이터가 나올 수 있도록 경계조건을 설정한다.

3.2 CAD Modeling

CFD 해석을 위한 작업 중 가장 먼저 CAD를 통해서 기

Figure 3. CFD analysis system.

Figure 4. CFD analysis chart.

Figure 5. Modeling type.

본적인 기하학적형상을 형성해야 한다.

CAD 프로그램은 3D-CAD 프로그램인 Uni-Graphics NX 6.0⁽³⁾을 사용하였으며, 모델링은 실제 설계도면에서 유체 출입구만 구현하여 진행하였다.

Table 1. Mesh Elements

Domain	Nodes	Elements
Fluid	162952	858034
HX_1Pass	13406	40142
HX_2Pass	6666	19274
HX_3Pass	9400	28032
Wall	44735	129891
All Domains	237159	1075373

Figure 6. Tetra Prism Mesh of CFX-Mesh.

모델링은 Figure 5에 나타난 것처럼 Figure 2의 도면을 바탕으로 모델링을 하여 맨 아래부분의 연소대를 시작으로 연소대와 1차 패스 사이에 공기가 들어 갈 수 있도록 공기유입구와 3차 패스에서는 토출구, 그리고 각 패스에서는 열교환기를 간략하게 구현하였다.

3.3 격자 형성

격자를 형성하기 위해 ANSYS CFX-Mesh⁽²⁾라는 프로그램을 사용하였다. Table 1과 같이 격자수는 약 100만 개로 하였으며, 격자타입은 테트라 프리즘 메쉬(tetra prism mesh)로 설정을 하였다. 격자크기는 최소 작은 사이즈가 1 mm(열매유 균열부위)이며, 큰 사이즈는 100 mm이다.

격자 생성은 CFD 해석을 하기 위한 가장 중요한 과정 중 하나이고, 격자생성 방식도 또한 중요하다. 이번 해석에서 사용한 방식은 Deloney 방식을 사용하여 형상의 가장 길면에 있는 표면에서 표면 메쉬를 형성하고, 모델링 내부로 격자를 형성하는 방식으로 실 모델링의 형상에 최대한 근접하게 형성하는 방식이므로 격자를 형성했다.

4. 해석조건

수치해석을 하기 위해서 ANSYS-CFX⁽⁴⁾의 CFD 상용코드를 사용하였다. 먼저 보일러에서 연료가 연소하고 1차, 2차, 3차 패스로 통과하여 출구로 나가는 유동과 각 열교환기 그리고 공기유입이 되는 입구부분들 각각의 경계 조건을 설정하였다.

4.1 공기유동

연소대에서 연료가 연소하여 출구로 빠져나가는 유체

Table 2. Condition of Control Volume

Materials	
Air at 25 C	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Buoyant
Buoyancy Reference Temperature	2.9300e+20 [K]
Gravity X Component	9.8000e+00 [m s ⁻²]
Gravity Y Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Gravity Z Component	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Buoyancy Reference Location	Automatic
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Thermal Energy
Turbulence Model	k epsilon
turbulent Wall Functions	Scalable

Figure 7. Boundary condition.

부분은 먼저 전체가 공기로 설정을 하였다. 실제 초기조건은 25 °C의 공기로 설정 하였으며, 중력조건을 주었다. 공기 내부에서 자체적으로 회전하는 유동이 없으므로 정상상태의 조건이 적용되었으며, 기압은 1기압(대기압)으로 설정하였다. 연소하여 열이 발생하므로 이 열에 대한 열교환이 필요하기 때문에 열교환 모델을 설정하였으며, 난류 모델은 가장 보편적으로 사용하고 있는 κ - ϵ 모델을 사용하였다^(4,5). 이러한 조건을 Table 2에 나타내었다.

4.2 공기 입, 출구 및 연소대

Figure 7은 공기 입, 출구 및 연소대의 경계조건을 표현하였다. 먼저 ①에서의 입구는 직경이 200 mm의 원형관이 양 옆으로 2개가 설치되어 약 32 m³/min의 공기로 유입이 되며, ②에서는 가로 350 mm, 세로 550 mm의 직사각관이 168 m³/min의 공기로 유입이 된다. 그리고 먼저 열매가 유입되는 속도는 2.6 m/s이지만, 그 속도는 관의 속도이므로 열교환기의 높이방향으로 설정할 시에는 실제 속도의 사인성분만을 나타내었기 때문에 2.6 m/s의 사인성분인 0.1 m/s를 설정하였다^(4,5).

연소대 설정은 먼저 연소온도가 1200 °C에서 생성이 되므로 1200 °C의 연소조건과 공기 50 m³/min을 설정하여 진행하였다^(4,5).

4.3 지배 방정식

본 연구에서 수치해석으로 사용한 지배방정식은 RANS (reynolds averaged Navier-Stokes) 모델을 사용하여 유체 모델을 풀게 되며, 다음과 같다.

$$\rho U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}$$

여기서 R_{ij} 는 다음과 같다.

$$R_{ij} = -\rho \bar{u_i u_j}$$

그리고 난류 모델로 사용된 κ - ϵ 모델은 다음과 같다.

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \underbrace{\mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{\text{Convection}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\}}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{\rho \epsilon}_{\text{Destruction}}$$

감소율에 대한 식은

$$\rho U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \underbrace{C_{1\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{k} \right) \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{\text{Generation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\}}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{C_{2\epsilon} \rho \left(\frac{\epsilon^2}{k} \right)}_{\text{Destruction}}$$

여기서 σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 는 실험 상수로 적용이 된다.

5. 결과 및 고찰

5.1 정상상태 가동 시

먼저 열매유가 누유 되지 않는 정상 운전 시의 보일러 내부와 연소대 부분의 온도분포 및 속도분포에 대한 수치 해석 결과는 Figure 8, 9와 같다.

Figure 8은 보일러 내의 전체 온도분포를 나타내고 있으며, 온도분포가 연소대 및 각 패스에서 안정적인 분포를 보이고 있다. 해석을 통해 연소대 외부로 관찰한 결과 높은 온도가 형성되지 않고 낮은 온도를 형성하고 있어 연소대가 안정하다는 것을 확인할 수 있다.

또한 Figure 9는 정상상태에서의 속도분포를 보이고 있다. 실제 유량에 맞추어 해석한 부분이기 때문에 유동은 실제와 비슷하다고 판단이 된다.

연소대 아랫부분 입구에서의 유동으로 인한 스윙현상이 발생하고 회전하는 유동이 발생하여 1차 패스를 통과한다. 이 유동은 2차 패스를 거쳐 3차 패스 앞까지 스윙유동을

Figure 8. Temperature in the synthetic heat transfer fluid boiler (steady-state).

Figure 9. Velocity in the synthetic heat transfer fluid boiler (steady-state).

Figure 11. Fire type in the boiler (synthetic heat transfer fluid oil leaking).

Figure 10. Temperature of steady-state 1st, 2nd, 3rd pass (x: temperature).

유지하면서 진행이 되며, 스월이 크게 형성되면서 벽면을 따라 형성이 되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10은 각 패스의 원통 중심부의 선을 지정하여 1, 2, 3차 패스의 온도분포를 나타내었다.

해석결과 1차 패스 온도는 2차 패스와 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 1차 패스에서 연소된 열이 2차 패스에서 쌓여지게 되기 때문에 온도 차이는 크지 않지만 3차 패스는 출구의 온도와 가깝게 되기 때문에 온도가 떨어지는 현상을 보이고 있다.

5.2 열매유 누유 시

시스템이 정지하기 직전의 조건은 14단 코일에서의 균

열이 생기고 누유가 발생하여 열매유가 연소대와 만나 내부의 평균온도가 높아지는 시점이다. 이때의 온도 분포는 내부 온도가 높아져서 2차 패스, 3차 패스도 열에 의한 영향을 받을 수 있다. 그리고 열매유가 누유 시 액화상태에서 기화상태로 바뀌어져 토출하는 조건으로 수치해석을 실시하였다.

Figure 11은 열매유 누유 시 온도분포로서 연소대의 온도는 거의 높은 온도 곧 큰 화염이 휩싸이는 모습이며, 그 열기가 2차 패스까지 확산되는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상으로 3차 패스까지 열이 전달되어 거의 화염으로 가득 찬 상태가 되었다.

즉, 1차 패스에서 화염의 온도가 크게 성장됨을 보여주고 있다. 연소대에서 열매유와 함께 연소반응을 하여 온도가 서서히 높아지면서 기류가 점차 빨라지는 것으로 나타났다. 유동이 정상상태와 비교할 때 기류의 방향은 유사하였으며, 속도는 화염의 온도상승으로 각 부분에서 차이가 있으나 대체적으로 빠른 흐름을 형성하고 있다.

연소대 부분에서 스월현상이 발생하여 회전하는 유동이 되고 1차 패스를 통과하여 2차 패스를 거쳐 3차 패스 앞까지 스월유동을 유지하였다.

기류의 유동은 벽면을 따라 형성이 되며 각 패스의 바깥쪽으로 유동을 보이고 있다. Figure 12와 같이 기류의 속도는 열매유가 투입되어도 Swirl의 유동은 변하지 않고 계속 진행이 되고 있다.

Figure 13은 화재가 발생하여 진행되는 도중 열매유 누유 시 온도분포를 나타낸 것이다. 보일러 내부 원통의 중심부에서 1, 2, 3차 패스의 온도 분포를 표현하였다.

해석결과 1차 패스 입구의 온도는 약 1,200 °C를 기점으로 열매유 누유지점까지는 약 1,200 °C 범위를 형성하다가

Figure 12. Velocity type in the boiler (synthetic heat transfer fluid oil leaking).

Figure 13. Temperature of steady-state 1st, 2nd, 3rd pass (synthetic heat transfer fluid oil leaking, x: temperature).

1차 패스 상부에 도달할수록 온도는 점차 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다.

Table 3과 같이 2차 패스에서는 입구의 온도와 출구의 온도가 약 947~1,032 °C 범위를 형성하며 화염이 흐르는 것을 관찰할 수 있었다. 2차 패스 중앙부의 온도는 947 °C로서 이는 2차 패스 중앙부분에 설치된 온도 센서의 데이터(약 935 °C)와 비교하면 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

2차 패스 최고온도는 상부가 1,034 °C, 하부가 1,059 °C가 되는 것을 해석을 통해 알 수 있었다.

1차 패스에서 연소된 열이 2차 패스에서 쌓여지게 되기 때문에 온도 차이는 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 3

Table 3. Location Temperature of 2nd Pass

Location		Temperature
Center	High	1,032 °C
	Low	947 °C
Up & Down	Up	1,034 °C
	Down	1,059 °C

Table 4. Location Temperature of 3rd Pass

Location		Temperature
Center	High	1,007 °C
	Low	767 °C
Up & Down	Up	1,007 °C
	Down	520 °C

차 패스의 입구는 2차 패스에서 토출된 온도에 영향을 받아 온도 분포(1,007 °C)는 큰 차이가 없었으나 Outlet Flow로 형성되면서 출구쪽에서 767 °C 정도의 노내 온도가 되는 것으로 해석되었다.

정상상태일 때는 1, 2, 3차 패스 및 연소대 온도분포가 안정적인 분포를 보이고 있다. 해석결과 데이터의 온도분포와 차이가 나지 않았으며, 연소대 외부에서도 높은 온도가 형성되지 않고 낮은 온도를 형성하고 있어 연소대가 안정하다는 것을 확인 할 수 있다.

정상상태에서 실제 공기의 공급에 맞추어 속도분포 해석 부분에 있어서 유동은 거의 실제와 비슷하다고 판단이 된다. 연소대 아랫부분의 입구는 유동으로 인한 스월현상이 발생하여 회전하는 유동이 되고 있다. 1차 패스를 통과한 후 이 유동은 2차 패스를 거쳐 3차 패스 앞까지 스월유동을 유지되는 것으로 나타났다.

열매유 누유로 인한 화재발생은 직경 2.3 m이고 높이 약 10 m의 원통형 공간 내부에서 화재 초기에 열매유가 120 kg/min 누유되었다. 내부 압력 7 bar로 매우 빠르게 분사되다가 균열 부위에서 열매유 누유와 함께 열매유의 기화(vapor)로 인한 누출이 연속적으로 이루어졌을 것으로 판단된다. 열매유가 누설되어 본격적으로 화재가 강해졌을 때 온도 센서에서는 935 °C의 온도를 나타내고 있다.

6. 결 론

열매유 보일러 내부화재를 해석한 결과는 열매유 누유로 인한 화재에서 연도내 화재 초기에 약 120 kg/min으로 열매유가 기화로 인해 분출되면서 화재 발생 후 2차 패스 연도온도는 935 °C 범위까지 상승하였다. 화염이 2차 패스와 3차 패스까지 열이 전달되며 화염 확대되고 2차 패스 최고온도는 1,059 °C, 3차 패스는 1,007 °C이며 바깥쪽으로부터 형성되면서 아래쪽에서는 온도가 767 °C로 해석되었다.

연소대에서의 화재는 1차 패스 균열부위에서 양정과 중

력에 의한 열매유가 토출되면서 연소대 턴테이블 위로 누유 된다. 연소대 하부에서 온도는 화재 시 183 °C로서 연소대 내부는 1,200 °C 이상 소화완료까지 장시간 형성됨을 확인할 수 있었다. 연소대의 온도는 순간적으로 여러 차례 최고점의 온도까지 도달하였으며, 이로 인하여 폭발, 폭굉이 발생되었음이 관찰된다.

후 기

본 연구는 (주)상수플랜트의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. H. H. Che, "Introduction to CATIA V5", Pearson Education Korea Ltd. (2002).
2. ANSYS User's Manual Ver. 12.1, ANSYS Inc. 2010.
3. D. Prescott, "Unigraphics NX 6.0 Tutorial Update", Department of mechanical engineering University of Victoria (2009).
4. C. W. Park and C. H. Hong, "User Guide of ANSYS Workbench", Intervision (2008).
5. Y. R. Kim, D. M. Lee and Y. Z. Kim, "Temperature and Flow Velocity Simulation for Fire in Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 472-475 (2012).
6. Y. R. Kim and D. M. Lee, "Temperature and Flow Velocity Simulation for Fire in Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler (2nd: SHTF Oil Leaking)", Proceedings of 2012 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 329-332 (2012).