



열매유 보일러 내부 화재에 따른 온도 및 속도분포 시뮬레이션

김엽래 · 이동명 · 김윤증
경민대학교 · 한신공영(주)

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

Yeob Rae Kim · Dong Myung Lee · Yun Zeung Kim

Kyungmin College University · Hanshin Eng. & Construction Co., Ltd.

요 약

MDF(Medium Density Fiberboard) 제조공정에 필요한 열매유(SHTF, Synthetic Heat Transfer Fluid)를 가열하는 보일러에서 화재가 발생하였다. 열매유 보일러는 1차 패스, 2차 패스, 3차 패스로 구성되어 있으며, 화재가 발생된 1차 패스 연소대 위쪽 14단 부근에서 열매유가 방출되었다. 화재확산으로 인한 조사내용 및 데이터를 토대로 화재 시뮬레이션용 전산유체역학인 ANSYS-CFX를 이용하여 재현하고 화재 모델링 해석 및 분석을 통해 화재 온도를 산정하고 피해의 범위를 규정하였다. 본 화재 사고로 설비의 운전 및 소재에 대한 피해를 규정하고, 이론에 의한 과학적인 정밀 조사를 실시하여 향후의 안전운전을 위한 제안을 하고자 한다.

1. 열매유 보일러의 구조와 화재진행 과정

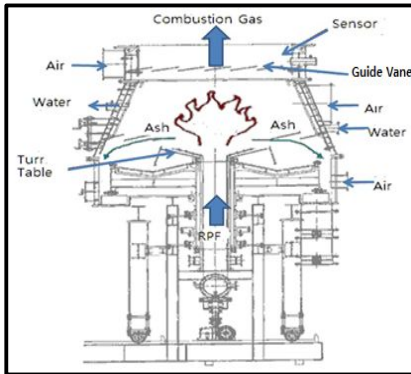
연소대 상부에는 수직 원통형인 열매유 보일러의 1차 패스가 위치하고 1차 패스를 지난 후에 4각 수평형의 2차 패스와 3중 원통형 코일의 3차 패스가 직각방향으로 차례로 통과하면서 열매유에 열교환을 하고 있다.

화재가 발생한 보일러는 Inverter의 고장으로 수동 작동되는 상황이었으며, 보일러 내의 모사에 정확한 값을 주지 못하는 불안정한 상태에서 운전이 지속되었다. 연료의 공급과 내부압력의 변화가 Inverter 작동 때보다 심한 편차를 보이기도 하였다. Inverter 고장 시부터 Unsteady-state 상태로 운전이 계속되어 정상상태의 운전이 힘든 상황이 되기도 하였다.

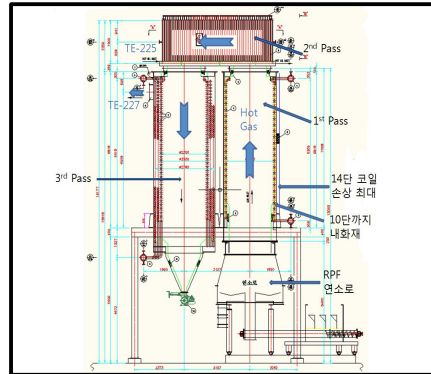
연소대의 온도 측정장치는 연소대 하부에 위치하고 있어 1차 패스 균열부위에서 열매유가 토출되면서 연소대 Turn table 위로 누유되어 화재확산은 가스상의 연료에서 10cm/s의 속도로 시작하여 밀폐영역에서 10⁵cm/s에 이르는 폭굉까지 일어날 수 있는 상황이다.

따라서 연소대 위치로 열매유가 쌓이면서 화재확산은 표면화염 확산, 혼소의 성장, 예혼합 화염전파에서의 화구(fire ball) 등을 포함하는 연소과정이 적용된다.

다시 말하면 화재성장(Developing Fire) ⇒ 플래시오버(Flashover) ⇒ 백드래프트(Back-draft) ⇒ 최성기(Fully Developed)로 발전한다. 플래시오버(Flashover) 원인으로 보면 열 유속의 증가에 따른 물질의 급속한 점화, 연료가스가 충분히 축적한 뒤 갑작스럽게 공기에 노출되는 경우 폭발 등이다. 그러므로 플래시오버는 흔히 모든 연료가 동시에 연소하게 되는 최성기 화재의 원인이 된다.



<Fig. 1> Burner

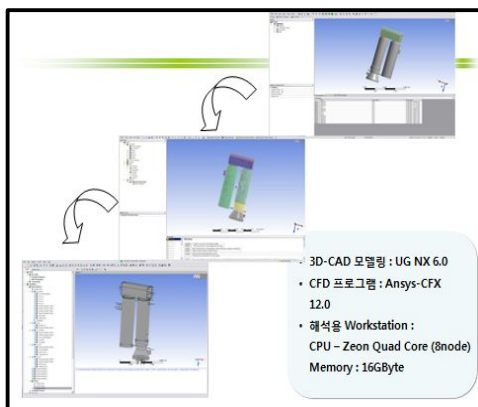


<Fig. 2> Front View of SHTF Boiler

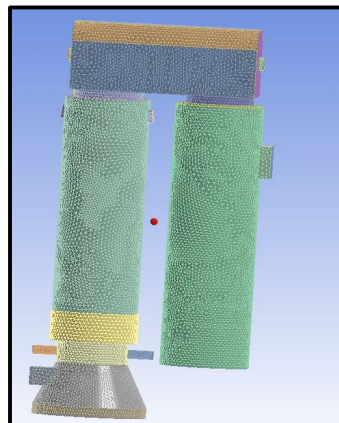
2. 시뮬레이션 조건 (CFD 해석)

CFD(Computational Fluid Dynamics) 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 Post과정을 하여 결과를 나타내게 된다. 하지만 Post과정에서 원하는 결과를 얻지 못하면 다시 경계조건에서 결과에 맞는 데이터가 나올 수 있도록 경계조건을 설정해야 한다.



<Fig. 3> CFD Analysis Proceeding



<Fig. 4> CFX-Mesh

격자를 형성하기 위해 ANSYS CFX-Mesh라는 프로그램을 사용하였다. 격자수는 약 1,00만개로 하였으며, 격자타입은 Tetra Prism Mesh로 설정을 하였다. 격자크기는 최소 작은 사이즈가 1mm(열매유 균열부위)이며, 큰 사이즈는 100mm이다.

3. 해석조건

해석을 하기 위해서 ANSYS-CFX라는 CFD 상용코드를 사용하였다. 먼저 보일러에서 연료가 연소하고 1차, 2차, 3차 패스로 통과하여 출구로 나가는 유동의 Control Volume 과 각 열교환기 그리고 공기유입이 되는 입구부분들 각각의 경계 조건을 설정하였다.

(지배 방정식)

지배방정식은 기본적으로 사용하는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)모델을 사용하여 유체모델을 풀게 되며 식은 다음과 같다.

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

Rij는 다음과 같다. $R_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j}$

그리고 난류 모델로 사용된 k-ε모델은

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \epsilon$$

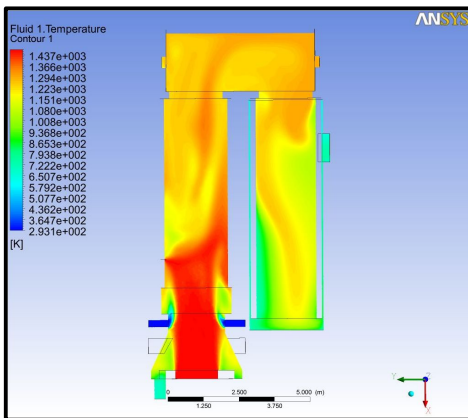
감소율에 대한 식은

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

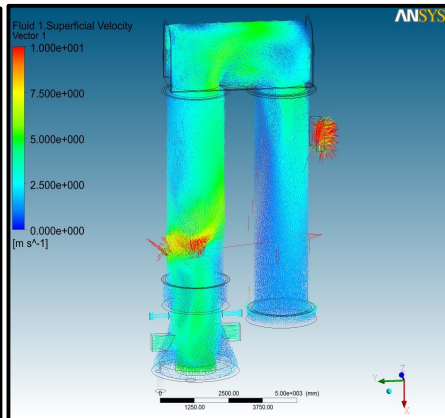
Convection
Generation
Diffusion
Destruction

4. 고찰

시스템이 정지하기 직전의 조건은 14단 코일에서의 균열이 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.

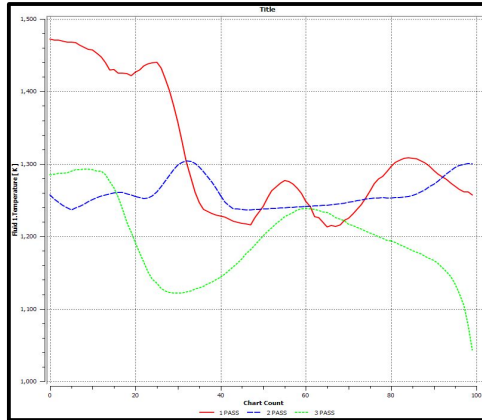


<Fig. 5> Developing Fire with SHTF Leak



<Fig. 6> Flame Velocity with SHTF Leak

열매유 누유 시 온도와 속도분포를 <Fig. 5, 6>에서 보여준다. 연소대의 온도는 거의 높은 온도 곧 큰 화염이 휩싸이는 모습이며, 그 열기가 2차 패스까지 전해진다. 그 영향으로 3차 패스까지 열이 전달되어 지고 연소대에서 균열부위는 거의 화염으로 가득 찬 상태이다. 이 화염이 1차 패스에서 화염의 온도가 크게 성장됨을 보여주고 있다.



<Fig. 7> Temperature Distribution of 1, 2, 3th Pass the central part

<Fig. 7>은 화재가 발생하여 진행되는 도중 열매유 누유시 온도분포를 그래프로 나타낸 것이다. 보일러 내부 원통의 중심부에 선을 지정하여 1, 2, 3차 패스의 온도 분포를 표현하였다. 시뮬레이션 해석 결과 1차 패스 입구의 온도는 약 1200℃를 기점으로 열매유 누유지점까지는 약 1200℃ 범위를 형성하다가 1차 패스 상부에 도달할수록 온도는 점차 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. 표 1과 같이 2차 패스에서는 입구의 온도와 출구의 온도가 약 947~1032℃ 범위를 형성하며 화염이 흐르는 것이 관찰된다. 2차 패스 중앙부의 온도는 947℃로서 이는 2차 패스 중앙부분에 설치된 온도센서의 데이터(약 935℃)와 비교하면 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

직경 2.3m이고 높이 약 10m의 원통형 공간 내부에서 화재 초기에 120kg/min, 내부 압력 0.7Mpa로 매우 빠르게 분사되다가 균열 부위에서 열매유 누유와 함께 열매유 기화(Vapor)로 인한 누출이 연속적으로 이루어졌을 것으로 판단된다. 열매유가 누설되어 본격적으로 화세가 강해졌을 때 온도센서에서는 935℃의 온도를 나타내고 있다.