

발전소 Deaerator floor의 복사효과 저감을 위한 열유동 해석

김태권^{1*}, 하지수¹, 최용석²

¹계명대학교 기계자동차공학과, ²계명대학교 기계공학과

A thermal-flow analysis of deaerator floor of power plant for reducing the radiative heat transfer effect

Tae-Kwon Kim^{1*}, Ji-Soo Ha¹, Yong-Seok Choi²

¹Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

²Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University

요약 화력발전은 화석연료인 석탄을 연소시켜 얻은 열에너지로 물을 끓여 증기를 만들고 그 증기로 터빈을 운전시켜 터빈 축에 연결된 발전기로 전기를 얻는 방식이다. 따라서 하절기에는 화력발전소 Deaerator의 표면온도는 70℃, Storage Tank의 표면온도는 67℃, 공기온도는 50℃를 상회한다. 이런 현상은 기기와 작업자에게 부적합한 영향을 끼친다. 특히, Deaerator와 Storage Tank에 인접해 있는 작업자는 복사열전달의 영향을 받아 더 높은 체감온도를 느끼게 된다. 따라서 본 논문에서는 전산해석을 통해 Deaerator 부근의 열유동 특성을 파악하고 단열재를 사용하였을 때와 복사차폐막을 사용하였을 때의 효과를 비교하여 최적의 냉각조건을 제시하였다. Case 1은 현재 발전소의 형상이고 Case 2는 Case 1에서 단열재를 추가로 사용한 형상이고 Case 3은 Case 1에서 복사차폐막을 사용한 형상이다. 유동은 벽면과 열원의 온도 차이에 의해 발생되었고 오른쪽 상단부에 고온의 공기가 포집된다. 온도 분포에서 작업자표면의 최대 온도를 비교해보면 단열재를 사용한 Case 2가 복사효과 저감에 가장 효율적인 것으로 나타났다.

Abstract Steam power generation is used to produce electricity through a generator that is connected to a steam turbine. As a result, the surface temperature of the deaerator is 70℃ during the summer season, the surface temperature of the storage tank is 67℃, and the air temperature is 50℃. This environment is inappropriate for workers and instruments. Workers adjacent to the deaerator and storage tank in particular feel higher temperatures because of the radiative heat transfer effect. Therefore, we optimized the cooling conditions by computational analysis. Case 1 is the current shape of the power plant, Case 2 has additional insulation, and Case 3 has a radiation shield. Flow is caused by a temperature difference between the heat sources in the wall, and hot air is trapped in the right upper end. Based on the temperature contours and the maximum temperature of the surfaces, Case 2 was found to be the most efficient for reducing radiative heat transfer effects.

Keywords : Deaerator, Insulation, Radiation shield, Radiative heat transfer effect.

1. 서론

1.1 연구배경

화력발전소 내의 Deaerator는 전기를 생산하기 위해 터빈을 작동시키고 배출된 고온의 유체들을 포집하여 녹

아있는 용존가스를 제거하는 설비이다. Deaerator는 항상 고온의 상태를 유지하고 있으며 특히, 하절기에 가장 더운 오후 2시와 4시 사이에 특정기기의 표면온도는 70℃를 상회하고 공기온도도 50℃까지 상승하게 된다. 이런 상황은 온도에 민감한 설비와 작업자에게 부적합한 환경

*Corresponding Author : Tae-Kwon Kim (Keimyung University)

Tel: +82-10-9750-5551 email: tkkim@kmu.ac.kr

Received August 30, 2016

Revised (1st December 5, 2016, 2nd December 7, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

이다. 또한, 작업자는 작업장의 위치가 Deaerator와 인접해 있어 복사의 영향을 크게 받아 실제 공기의 온도보다 더 높은 체감온도를 가진다. 따라서 Deaerator 주변의 복사효과 저감을 위한 방안 마련이 시급한 상황이다. 복사효과 저감을 위한 방안으로 Deaerator와 표면 사이에 표면의 온도를 저감시켜 주는 단열재(Insulation)를 부착하는 방법과 표면을 차폐시켜 복사효과를 감소시키는 복사차폐막(Radiation Shield)을 설치하는 방법 등이 있다.

이에 본 논문에서는 열 유체 전산해석 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 Deaerator 부근의 열 유동 특성을 파악하고 단열재를 사용하였을 때와 복사차폐막을 사용하였을 때의 효과를 비교하여 최적의 조건을 제시하고자 한다.

2. 전산해석

2.1 지배방정식

발전소 Deaerator floor 열유동 해석을 수행하기 위해 전산 열유체 해석 소프트웨어 중 하나인 FLUENT를 이용하였다. 유동장을 적당한 검사체적으로 나눈 후 지배방정식을 검사체적에 대해 적분하는 유한체적법(Finite Volume Method)과 Pantaka의 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 유동장의 수치해석에 이용하였다.[1]

본 연구에서 사용된 식은 2차원 정상상태의 지배방정식이며 식(1)은 연속방정식, 식(2)는 x방향의 운동량 방정식, 식(3)은 y방향의 운동량 방정식, 식(4)는 에너지방정식, 식(5)는 복사를 해석하기 위한 DO(Discrete Ordinates) radiation model 방정식이다. 또한 Deaerator floor의 난류유동 해석에 FLUENT내 Standard k-ε 모델을 사용하였다.[2-4]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &+ \rho g_x \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &+ \rho g_y \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \dot{w} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) \\ &= \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}^t) \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}^t) d\Omega^t \\ &+ an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \end{aligned} \tag{5}$$

2.1 모델링

Deaerator floor의 복사 영향을 파악하기 위해 3가지 케이스로 모델링하여 같은 경계조건으로 해석을 진행하였다. Case 1은 현재의 발전소의 상태로 추가적인 단열재나 복사차폐막이 없는 형상으로 Fig. 1이다. Case 2는 Case 1에서 50mm만큼의 단열재가 추가된 형상이다. Case 3은 Case 1에서 50mm만큼 이격하여 복사차폐막이 추가된 형상이다. Case 2와 Case 3은 Case 1과 기본적인 형상은 같고 Deaerator와 Storage Tank 표면에 단열재와 복사차폐막의 설치 유무에 따라 나뉘며 Fig. 2에 나타나 있다.

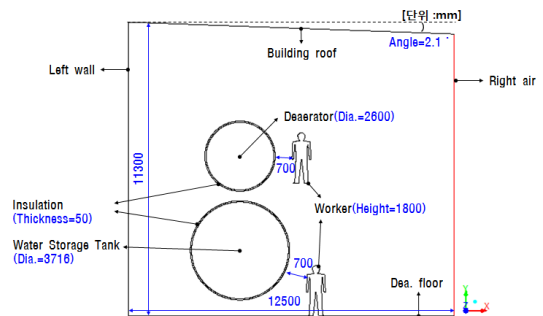


Fig. 1. Modeling of deaerator floor

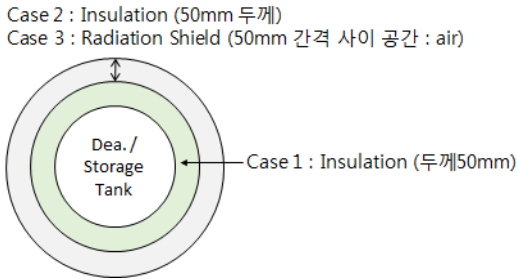


Fig. 2. Cases of insulation and radiation shield

격자는 원형으로 이루어진 Deaerator 부분과 주변 사각형 격자와 만나는 부분, 사람형상 Worker의 팔과 다리 근처의 좁은 구간에서 격자의 Quality가 떨어질 것으로 판단되어 Worker와 Radiation Shield, Insulation의 Mesh Sizing을 따로 부여하여 생성하였다. 2차원형상으로 모델링하였으나 사람형상 등 복잡한 부분이 있어 개수는 약 64200개로 2차원 형상임에도 불구하고 비교적 많고 Quality는 0.95로 좋은 Quality를 가진 격자로 볼 수 있다.

2.3 경계조건

경계조건은 앞서 언급하였듯이 3가지 Case는 같은 경계조건을 가지는데 작업자의 온도를 해석하기 위해 Deaerator와 Storage Tank에 Convection과 Heat Transfer Coefficient를 주고 사람형상의 Worker에 Coupled조건을 주어 주위의 영향으로 온도가 변화하도록 입력하였다. k-epsilon model을 사용하여 난류 유동 해

Table 1. Boundary Conditions

Part	Boundary Condition
Deaerator	235 °C , Convection, Heat transfer coefficient : 6
Storage Tank	200.5 °C , Convection, Heat transfer coefficient : 6
Dea. Floor	43.4 °C
Building roof	43 °C
Left Wall	42 °C
Right Wall	41 °C
Worker1	Coupled
Wall Internal Emissivity	1.0
Shield Internal Emissivity	0.8
Insulation Density	230 kg/m ³
Insulation Thermal Conductivity	0.072 W/m · k

석을 하였고 DO(discrete ordinates) 모델을 사용하여 복사열전달 해석을 하였다. 경계조건에 대한 내용은 Table 1.에 정리되어 있다.[5-7]

3. 결과 및 토의

3.1 속도분포

Case 1의 유동은 Fig. 3. (a)에서 보는바와 같이 별도의 외기유입조건 없이 오직 온도 차이에 의해 유동이 발

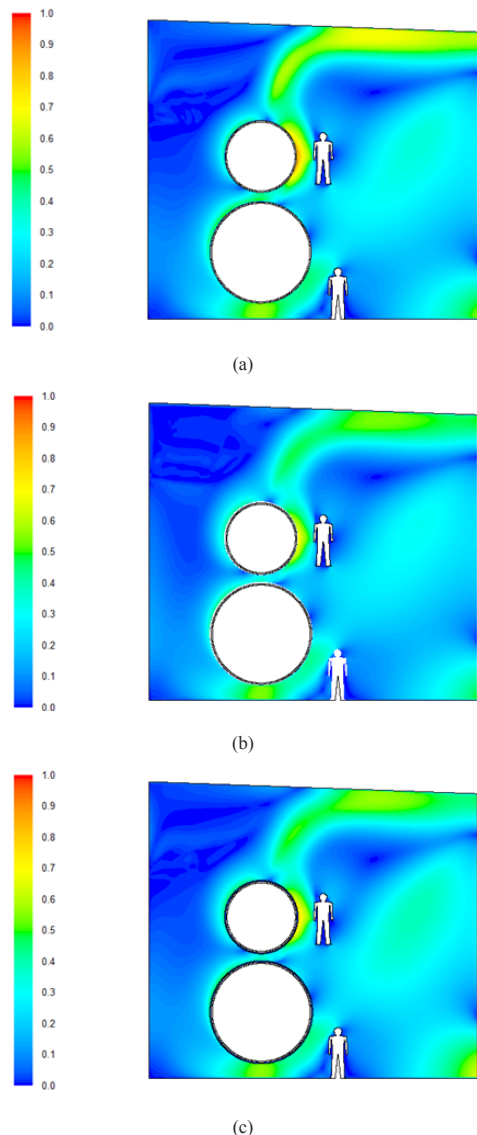


Fig. 3. Velocity contours (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

생한다. Deaerator 부근의 작업자 윗 쪽과 Storage Tank 부근의 작업자의 오른쪽과 왼쪽에서 와류로 인한 재순환 영역이 발생한다. 또한 Deaerator의 왼쪽 상단부분과 작업자의 주변에서 정체구간이 발생한다.

Case 2의 유동은 Fig. 3. (b)에 나타나듯 단열재의 두께를 제외하고 Case 1과 경계조건이 같으므로 Case 1과 마찬가지로 오직 온도 차이에 의해 유동이 발생한다. 따라서 Fig. 3. (b)에 나타나듯 Case 1과 전반적으로 비슷한 유동흐름을 보인다.

Case 3의 유동 또한 Fig. 3. (c)에 나타나듯 앞선 Case와 비슷하게 온도 차이에 의해 유동이 발생하기 때문에 전반적으로 형태가 비슷하다. 하지만 앞선 Case와 달리 단열재 대신 복사차폐막이 형성되어 있기 때문에 단열재와 복사차폐막 사이공간에 공기의 흐름이 없고 전반적인 유속이 더 빠른 것을 볼 수 있다.

유동해석 결과를 보면 모든 케이스가 비슷한 형태를 보인다. 이는 별도의 외기유입조건 없이 오직 벽면과 Deaerator와 Storage Tank의 온도 차이에 의해 유동이 생기기 때문이다. 대부분의 영역에서 유동이 거의 없고 Deaerator 부근의 작업자 윗 쪽과 Storage Tank 부근의 작업자의 오른쪽과 왼쪽에서 와류로 인한 재순환영역이 발생하고 왼쪽 상단부분과 작업자 부근에서 정체구간이 발생한다. 특히, Case 3의 복사 차폐막과 Deaerator와 Storage Tank 사이의 공기는 별다른 조건이 없으므로 거의 흐름이 없는 것을 볼 수 있다. 주된 유동으로는 Deaerator와 Storage Tank의 주변에 유동이 형성되어 오른쪽 상단부분으로 올라가는 것을 볼 수 있다.

3.2 온도분포

Fig. 4. (a)는 Case 1의 온도분포를 나타낸 것이다. 벽면과 Deaerator와 Storage Tank사이의 온도 차이에 의해 유동흐름에 따라 온도변화가 생긴다. 전반적인 온도분포는 열원인 Deaerator와 Storage Tank주변으로 부터 오른쪽 상단으로 고온의 공기가 올라가고 상대적으로 온도가 낮은 공기가 좌측 상단에 포집하게 된다.

Fig. 4. (b)는 Case 2의 온도분포를 나타낸 것이다. 전반적인 온도분포는 Case 1과 유사하게 열원인 Deaerator와 Storage Tank주변으로 부터 오른쪽 상단으로 고온의 공기가 올라가고 상대적으로 온도가 낮은 공기가 좌측 상단에 포집하게 된다. 하지만 Case 2의 경우 단열재의 두께가 Case 1보다 두꺼워서 열원의 온도가 상대적으로

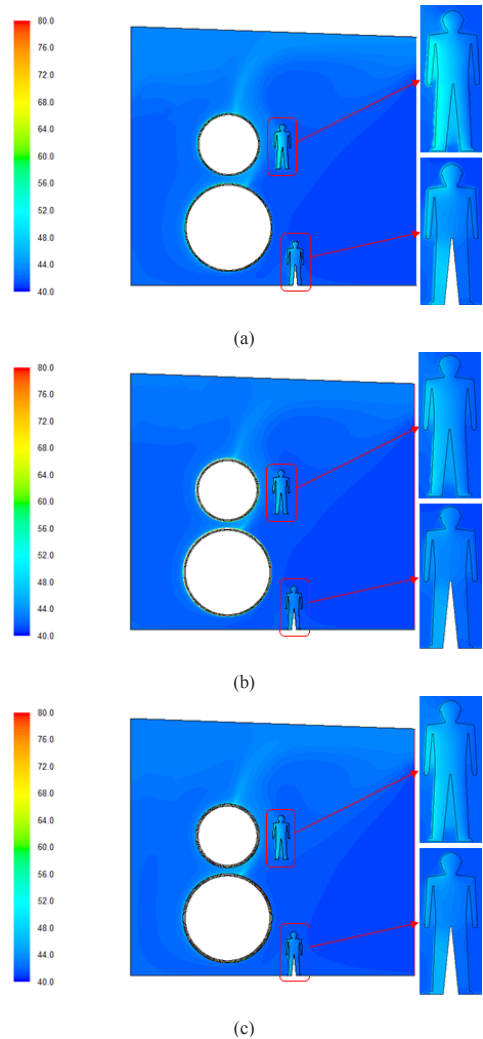


Fig. 4. Temperature contours (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

낮기 때문에 전체적인 온도가 Case 1에 비해 낮은 것을 볼 수 있다.

Fig. 4. (c)는 Case 3의 온도분포를 나타낸 것이다. Case 3 또한 전반적인 온도분포는 유사하지만 Case 1, Case 2와 달리 열원인 Deaerator와 Storage Tank주변으로 부터 상단부에 전반적으로 유사한 고온의 공기가 형성되는 온도분포를 보인다. 또한 Case 3의 경우는 단열재에 복사 차폐막이 추가되었기 때문에 그 사이의 공간이 매우 고온을 나타내는 것을 알 수 있다. 전반적인 온도 저감효과는 상대적으로 적은 것을 알 수 있다.

온도해석 결과를 보면 Case 1의 경우 Deaerator의 최대온도는 65.3℃, Deaerator Worker의 최대온도는 55.6℃, Storage Tank의 최대온도는 61.3℃, Storage Tank Worker의 최대 온도는 50.3℃이다.

Case 2를 보면 Deaerator의 최대온도는 55.1℃, Deaerator Worker의 최대온도는 49.9℃, Storage Tank의 최대온도는 52.6℃, Storage Tank Worker의 최대 온도는 46.3℃이다.

Case 3을 보면 Deaerator의 최대온도는 57.7℃, Deaerator Worker의 최대온도는 50.9℃, Storage Tank의 최대온도는 54.7℃, Storage Tank Worker의 최대 온도는 47.1℃이다. 따라서 열원의 표면과 작업자의 최대온도를 비교해 보았을 때, 현재의 발전소 상황에서 단열재를 50mm추가한 Case 2가 가장 효율적인 것으로 나타났다.

위의 온도분포에 보는바와 같이 작업자는 실제 공기 온도보다 더 높은 체감온도를 가진다. 이는 Deaerator와 매우 인접해 있어서 복사 열전달의 효과가 크기 때문이다. 아래의 Table 2-4.는 Deaerator와 Storage Tank의 표면과 작업자의 최대 온도를 정리한 표이다. Table 5.는 Table 2-4.를 바탕으로 비교하기 쉽게 그래프로 나타낸 것이다.

Table 2. Maxium temperature of Case 1

Part	Max. temp
Deaerator Surface	65.3℃
Deaerator Worker	55.6℃
Storage Tank Surface	61.3℃
Storage Tank Worker	50.3℃

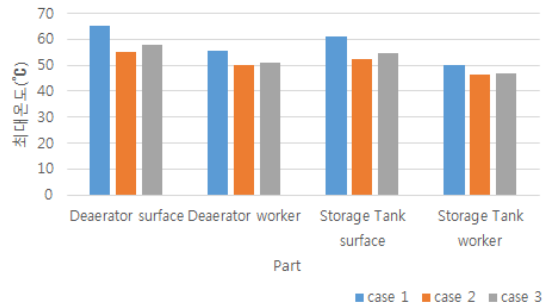
Table 3. Maxium temperature of Case 2

Part	Max. temp
Deaerator Surface	55.1℃
Deaerator Worker	49.9℃
Storage Tank Surface	52.6℃
Deaerator Worker	46.3℃

Table 4. Maxium temperature of Case 3

Part	Max. temp
Deaerator Surface	57.7℃
Deaerator Worker	50.9℃
Storage Tank Surface	54.7℃
Storage Tank Worker	47.1℃

Table 5. Graph of maxium temperature



4. 결론

본 논문에서는 Deaerator 부근의 열 유동 특성을 파악하여 단열재를 사용하였을 때와 복사차폐막을 사용하였을 때의 효과를 비교하여 최적의 조건을 제시하고자 하였다. 해석결과를 요약해보면 다음과 같다.

1. 속도분포를 보면 모든 Case에서 열원인 Deaerator와 Storage Tank, 벽면들의 온도 차이에 의해 유동이 생긴다. 유동은 고온의 공기가 열원의 표면을 타고 오른쪽 상단부로 올라가게 된다.
2. 온도분포를 보면 전반적인 온도분포형태는 유사하다. 먼저 Deaerator 부근에 있는 Deaerator Worker의 최대온도를 보면 발전소의 현재 형상인 Case 1은 55.6℃, Case 1에서 단열재를 추가로 사용한 Case 2는 49.9℃, Case 1에서 복사차폐막을 사용한 Case 3은 50.9℃로 나타났다.
3. Storage Tank 부근에 있는 Storage Tank Worker의 최대온도를 보면 Case 1은 50.3℃, Case 2는 46.3℃, Case 3은 47.1℃로 나타났다. 따라서 기존의 형상에서 단열재를 추가로 사용한 Case 2가 복사열전달의 효과 저감에 가장 효율적인 것으로 나타났다.

References

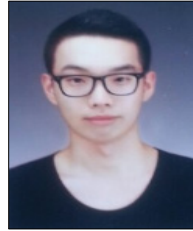
- [1] S. V. Pantaker, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [2] B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, A. P. Rothmayer, Fluid Mechanics, 7th Edition, John Wiley &

Sons, Inc, 2013.

- [3] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [4] J. Y. Kim, Fluent Basic, TSNE, 2012.
- [5] K. H. Lee, H. S. Lee, M. S. Choi, "Analysis of Radiative-Convective Heat Transfer about a Circular Cylinder in Crossflow Using Finite Volume Radiation Solution Method," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, vol. 20, no. 1, pp. 346-358, 1996.
- [6] Y. M. Kim, B. H. Kang, S. J. Park, "An Experimental Study on the Thermal Load of a Cryochamber with Radiation Shields," Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 20, no. 1, pp. 11-16, 2008.
- [7] C. H. Jang, "Heat Transfer Analysis of Radiation Shield Layers in Vacuum Insulation Panels," Korea Advanced Institute of Science and Technology Ph. D. Dissertation, 2012.

최 용 석(Yong-Seok Choi)

[준회원]



- 2015년 2월 : 계명대학교 기계자동차공학과 (학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 일반대학원 기계공학과 (석사 재학)

<관심분야>
연소공학

김 태 권(Tae-Kwon Kim)

[정회원]



- 1981년 3월 ~ 1995년 8월 : 한국 기계연구원 동력기계연구실장
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 연소공학 전공 (박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학 교수

<관심분야>
연소공학

하 지 수(Ji-Soo Ha)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 항공공학 전공 (박사)
- 1991년 3월 ~ 2007년 2월 : 현대중공업 산업기술연구소 수석연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학 교수

<관심분야>
항공공학