

습식 배연탈황 시스템의 효율 향상을 위한 전산해석

황우현*, 이경옥**

Computational Fluid Dynamic Analysis for Improving the Efficiency of Desulfurization System for the Wet Flue Gas

Woo-Hyeon Hwang*, Kyung-Ok Lee**

요약

본 논문에서는 CFDRC 사의 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+로 전산유체역학 기법을 적용하여 수치 해석을 수행하여 배연탈황 설비에서 Induced Draft Fan(I.D.Fan) 출구부터 Booster Up Fan(B.U.Fan) 입구까지 난류 유동장과 연소 유동 문제를 모사하여 배기가스 계통 설비의 유동 특성을 해석하였다. 배기가스가 I.D.Fan 출구 ~ B.U.Fan 입구 구간을 적정속도로 균일하게 유동하여 B.U.Fan로 균일하게 유입되도록 하며 압력손실이 적게 발생하도록 설계기준 보일러 부하와 최대연속 정격유량의 보일러 부하에서 이 구간의 안내깃을 검토하였다. 검토한 결과에 대해 CFD 해석을 수행하여 I.D.Fan 출구에서 안내깃을 제거하고 B.U.Fan 입구 전에 안내깃을 보강할 수 있도록 설계를 변경하였다. 배기가스 계통에 변경된 설계를 적용하여 수치모사한 결과에서 배연탈황 설비 내부의 배기가스 압력손실이 줄어들고 유속과 유선이 균일하게 유동할 수 있어 배연탈황 시스템의 효율이 향상된 것을 확인하였다.

▶ Keywords : 전산유체역학, 배연탈황, 안내깃, 비상 덕트

Abstract

In this paper the flow dynamics of the flue gas equipment in the desulfurization system was numerically analyzed by simulating the problems for the turbulent and combustion flow from Induced Draft Fan(I.D.Fan) outlet to Booster Up Fan(B.U.Fan) inlet using the commercial CFD software of CFD-ACE+ in CFDRC company for Computational Fluid Dynamic Analysis. The guide vane of this section was examined for the minimum pressure loss and the uniform flow dynamic to

•제1저자: 황우현 •교신저자: 이경옥

•투고일: 2014. 1. 21, 심사일: 2014. 2. 3., 게재확정일: 2014. 2. 13.

* 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation, Dongyang Mirae University)

** 경기과학기술대학교 청정환경과 (Department of Clean Production, Gyeonggi College of Science and Technology)

B.U.Fan with the proper velocity from I.D.Fan exit to B.U.Fan inlet section at the boiler both the maximum continuous rating and the design base. The guide vanes at I.D.Fan outlet and B.U.Fan inlet were removed and modified by numerical simulation of the CFD analysis. The flue gas at the system had the less pressure loss and the uniform flow dynamics of the flow velocity and flow line by comparing with the old design equipment.

▶ Keywords : Computational Fluid Dynamic, Flue gas desulfurization, Guide vane, Duct

I. 서 론

배연탈황 설비에서 배기가스의 유동 흐름이 균일하지 않거나 압력손실이 크게 나타나는 경우 안내깃을 설치하는 방안이 제시되고 있지만 대부분 발전소에서는 설계가 복잡하고 해석이 어려워 효율적인 유동을 얻을 수 있는 방안을 찾지 못하고 있다. 최근에 배연탈황 설비에서 유동 균일화 변수를 도입하여 제열기 출구와 덕트 냉각기 내의 유동에 대한 연구를 수행하여 최적의 안내깃의 형상을 구하는 연구를 수행한바 있다 [1, 2, 3].

석탄을 사용하는 화력발전소는 대기오염 물질 배출원으로 질소 화합물과 황산화물의 주 발생 원인으로 인식되고 있다. 선진국에서도 환경 규제치를 보다 강화하여 적극적인 환경정책을 실행하고 있고 우리나라도 배출 규제를 더욱 강화하고 있다. 점점 강화되고 있는 배출 규제를 맞추기 위하여 발전소에서는 유황이 적은 연료로 대체하거나 기존의 장치를 다시 설계하여 변경하거나 추가적인 장치를 장착하여 이를 해결하고자 노력하고 있다. 현재 산업현장에서 많이 사용되고 있는 배연탈황 공정에 대하여 효율을 향상할 수 있는 방안을 연구하기 위하여 전산유체역학적인 수치해석을 수행하여 이를 해석하고 분석하고자 한다. 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 국내외에서 이미 탈황설비의 유동해석을 위해 적합한 것으로 검증된 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+ (미국, CFDRC사)를 사용하여 본 연구의 대상에 대한 수치해석을 수행하고자 한다[4, 5, 6, 7].

본 연구에서는 A화력발전소에서 배연탈황 설비 중에서 I.D.Fan(Induced Draft Fan) 출구에서 B.U.Fan(Booster Up Fan) 입구까지 난류 유동장을 전산유체역학기법을 이용하여 수치 해석하여 설계기준 보일러 부하조건에서

운전할 때 배기가스 계통 설비의 유동 특성을 해석하고자 한다. 또한, 이 때 연소가스의 유동 분포가 균일할 수 있도록 설계를 변경하는 방안을 고려하여 배기가스 계통의 설비 내부의 압력손실을 최소화 하고 유속과 유선을 분석하여 효율을 향상시키고자 한다. 이를 위하여 먼저 배연탈황 설비에 대한 해석을 수행하기 위한 구체적인 설비 영역을 검토하고, 수치해석 및 계산을 위한 알고리즘과 경계조건을 설정하여 기존 설비의 특성을 파악하고 개선된 설계 조건을 제시하고자 한다.

II. 배연탈황 설비의 해석영역

2.1 배연탈황 설비의 개요

화력발전소의 배연탈황(Flue Gas Desulfurization: FGD) 설비내부를 흐르는 배기가스의 유동특성은 흡수탑 계통과 배기가스 계통으로 나누어 고려한다. 이번 연구에서 적용되는 배연탈황설비의 형식은 그림1과 같이 한국형 배연탈황 흡수탑이다.

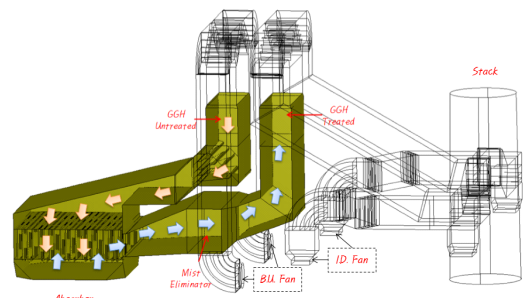


그림 1. FGD 시스템에서 흡수탑의 형상
Fig. 1. Schematic diagram of absorber in the FGD system

배연 탈황설비의 흡수탑 계통은 그림3과 같이 GGH untreated를 통과한 배기가스가 흡수액과 접촉하여 황산화물을 제거하고 습분제거기(mist eliminator)를 통과하여 GGH treated로 유입되는 구간이다. 한국형 배연탈황흡수탑에서 배기가스는 흡수탑 입구와 상부 천정부에 설치된 슬러리 노즐에서 분사되는 석회석 슬러리에 의해 냉각되어 덕트 파이프를 통해 반응 탱크로 유입된다. 반응 탱크에서 배기가스 중 황산화물은 석회석 슬러리와 접촉하면서 고형 침전물인 석고로 변환되어 제거된다. 황산화물이 제거된 배기가스는 흡수탑 출구를 통과하여 배기가스 중에 남아 있는 습분을 습분제거기에서 제거한 후 GGH treated로 유입된다.

일반적으로 배연탈황 설비 중 배기가스 계통은 그림 2와 같이 4개의 구간으로 나누어 고려한다. 그림 2에서 (a)는 유인 송풍기 출구에서 승압팬 입구까지이며, (b)는 비상용 덕트로서 승압팬 입구에서 연돌(Stack) 입구까지이고, (c)는 승압팬 출구에서 GGH 입구까지이며, (d)는 GGH 출구에서 연돌 입구까지 4개의 구간으로 나눌 수 있다.

그림 2 (a) 구간은 황산화물이 포함된 배기가스가 전기집진기에서 비산재를 제거한 후에 유인 송풍팬(I.D.Fan)을 지나서 탈황설비를 통과할 수 있도록 압력을 상승시키기 위한 승압팬(B.U.Fan)을 통과하는 구간이다. 그림2 (b) 구간은 배연탈황설비의 유지보수 등이 있는 경우에 배기가스가 전기집진기를 통과 후 유인송풍팬(I.D.Fan)에서 배연탈황설비를 거치지 않고 바로 연돌을 통과하여 배출시킬 때 필요한 비상덕트 구간이다. 그림 2 (c) 구간은 승압팬을 통과한 고온의

배기가스는 흡수액을 통과할 때 SOx의 제거률을 높이기 위하여 GGH(Gas Gas Heater) Untreated에서 저온으로 냉각되어 흡수탑으로 유입되는 구간이다. 그림 2 (d) 구간은 흡수탑에서 SOx성분을 제거한 후 백연현상을 방지하기 위하여 저온의 가스는 GGH treated를 통과하면서 가열되어 고온의 가스로 연돌로 배출된다. 일반적으로 GGH는 1 rmp 이내의 저속으로 회전하면서 고온과 저온의 배기가스의 열교환을 일으키는 부속설비이다.

2.2 해석영역

본 연구에서 해석영역은 배연탈황설비의 배기가스 계통 중에 그림2 (a)와 (b) 같이 정상운전과 비상운전 할 때 배기가스의 유동방향이 바뀌는 분기 덕트를 포함하는 유인송풍팬 출구에서 승압팬 입구 덕트와 유인송풍팬 출구에서 연돌 입구까지의 2개 덕트이다. 2개 덕트의 크기는 그림 3과 같다.

그림 4는 정상 운전시에 사용되는 유인 송풍팬 출구에서 승압팬 입구 덕트구간으로 곡관 연결덕트 그림 4 ①에 안내깃을 설치하지 않은 경우와 설치하는 경우의 덕트 형상을 전산해석하였다. 그림 5는 비상 운전시에 사용되는 유인 송풍팬 출구에서 연돌 입구까지의 덕트 구간으로 그림 5,①에 안내깃을 설치하지 않은 경우와 설치하는 2가지 경우의 덕트 형상을 전산해석 하였다. 그림 4 ①과 그림 5 ①은 동일한 덕트부분으로 그림 4 ①에 안내깃이 설치되면 그림 5 ①은 동일한 안내깃이 적용된다.

그림 4, 5의 각각의 덕트는 표1과 같이 수렴성과 안정성을 고려하여 각 계산 격자의 크기의 편차가 최소화되도록 격자를 만들었다.

표 1. 계산격자 형태와 셀수

Table 1. Number of the cell and shape for the calculation grid

Operation condition	section	Total cells/(mesh type)	
		Case 1	Case 2
Normal	ID fan outlet ~BU fan inlet	580,016 (Structure mesh)	1,387,268 (Hybrid mesh)
		1,423,800 (Hybrid mesh)	2,234,881 (Hybrid mesh)

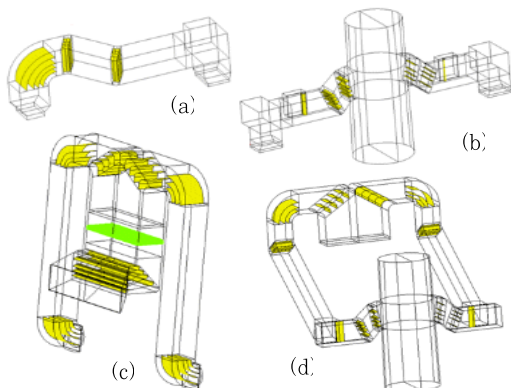


그림 2. FGD 시스템에서 (a) I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구, (b) 비상용 덕트 I.D.Fan 입구에서 스택 입구, (c) B.U.Fan 출구에서 덕트 냉각기 입구, (d) GGH 처리출구에서 스택 입구까지의 형상

Fig. 2. Schematic diagram of (a) I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet (b) Emergency duct I.D.Fan inlet to stack inlet (c) B.U.Fan outlet to duct cooler inlet (d) GGH treated outlet to stack inlet in the FGD system

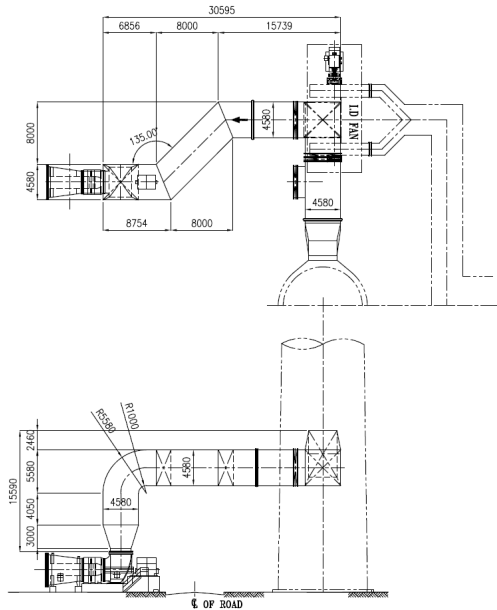


그림 3. 배기가스 계통 중 해석영역
Fig. 3. Analysis section for flue gas system

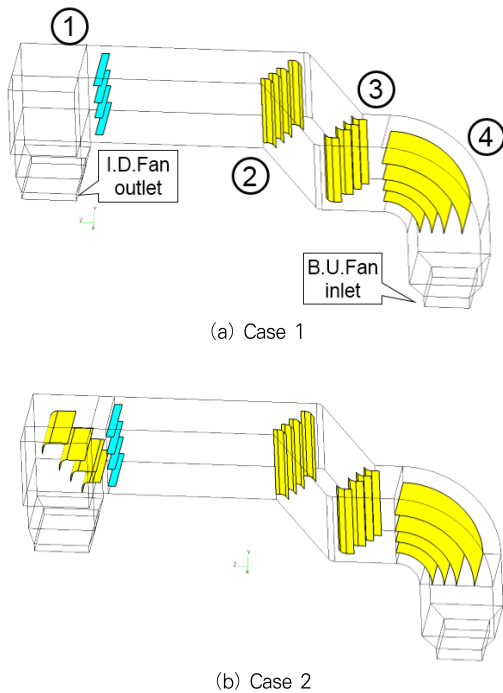


그림 4. 유인 송풍팬 출구에서 승압팬 입구까지 덕트 형상(정상운전)
Fig. 4. The duct shape from I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet (normal operation)

III. 수치 해석 방법

3.1 전산해석을 위한 가정

배연탈황설비의 유인 송풍팬에서 승압팬 사이의 배기가스 덕트 계통에서 배기가스의 유동 특성을 다음과 같이 가정한다.

- (1) 배기가스는 정상 비압축성 뉴턴 유체이다.

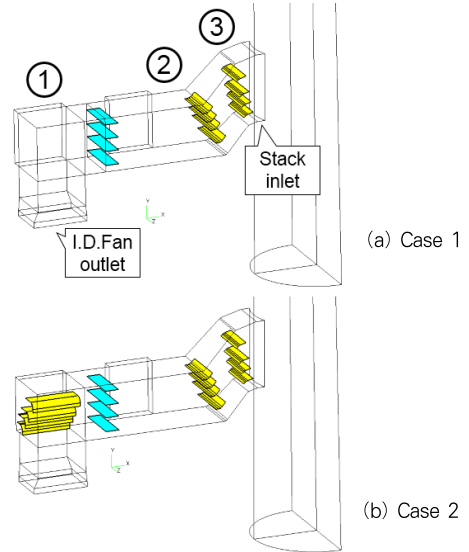


그림 5. 유인 송풍팬 출구에서 연돌 입구까지 덕트형상 (비상운전)
Fig. 5. The duct shape from I.D.Fan outlet to stack inlet (emergency operation)

- (2) 배기가스의 온도와 화학조성은 배기가스 계통에서 표 2와 같이 일정하다고 가정한다. 따라서 해석 영역에서 배기가스의 밀도와 점도는 덕트에서 일정한 값으로 정의한다.

표 2. 배기가스 밀도와 점도
Table 2. The density and viscosity of flue gas

Temp. (K)	Gas Composition, (vol%)				Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m·s)
	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O		
409.15	72.3	2.9	13.	11.	0.9	2.060×10 ⁻⁵
	3	8	62	07		

- (3) 배기가스의 본체 힘(body force)에 의한 운동량 변화는 무시한다.

- (4) 각 전산해석 영역의 입구 수직단면에서 배기가스의 유속은 유동방향에 대하여 일정하다.

(5) 배기가스는 벽면에서 미끄럼 방지조건(No slip boundary condition)을 만족한다고 가정한다.

(6) 해석 대상 내에 댐퍼(damper)가 설치되어 있는 경우에는 댐퍼의 개도율은 모두 열린 것이나 모두 닫힌 상태로 전산 해석한다.

3.2 지배방정식과 해석모델

배기가스 계통과 흡수탑 내부의 유동, 압력분포 등을 해석하기 위하여 질량보존방정식, 운동량보존방정식, 난류방정식(표준 $k-\epsilon$ 난류모델) 등을 적용하였다. 수치해석 기법은 계산영역을 임의 모양의 셀로 나누어 셀 중심에 압력과 속도 성분을 모두 저장하는 셀 중심 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였다.

(1) 질량 보존방정식

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

(2) 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기서 S_m 은 화학반응에 의한 질량 생성 항이고, p 는 정압, g_i 는 중력, F_i 는 힘이고, 응력텐서는 다음 식과 같다.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

(3) 난류모델

난류 운동에너지 k 방정식은 운동량 방정식에서 유도할 수 있는 반면에 난류운동에너지 소산율 ϵ 방정식은 물리적인 타당성 및 수학적 개념의 상사성을 이용하여 얻어진 방정식이다.

- 난류 운동에너지 k 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

- 난류 소산율 ϵ 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = C_{\epsilon_1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon_2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

여기서 $C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon_1} = 1.44$, $C_{\epsilon_2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ 이다.

3.3 경계조건

정상유전과 비정상유전을 실시하는 경우 배기가스의 균일도와 압력손실에 미치는 안내깃의 영향을 해석하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

1) 입구 경계조건

정상유전과 비정상유전 모두 유인 송풍기 출구를 해석의 입구로 정하고 경계조건은 표3과 같이 고정 정상속도(fixed normal velocity) 조건을 부여하였다.

2) 출구 경계조건

전산해석의 출구 경계조건은 표4와 정상유전에서는 승압팬 입구, 비정상유전에서는 연돌 출구를 전산 해석의 출구로 정하고 고정압력(fixed pressure) 경계조건을 적용하였다. 이때 연돌의 출구는 역류되는 유동이 발생하지 않는 연돌 높이로 설정하였다.

표 3. 입구 경계조건
Table 3. Boundary condition at the inlet

Variable	Unit	Normal	Emergency
static pressure, P_s	Pa	1.013×10^5	1.013×10^5
temperature, T	K	409.15	409.15
total gas flow, Q	Am^3/h	2,981,527	2,981,527
velocity, V_n	m/s	23.515	23.515
kinetic energy, k	m^2/s^2	0.747	0.747
dissipation rate, ϵ	m^2/s^3	0.409	0.409

표 4 출구 경계조건
Table 4. Boundary condition at the outlet

Variable	Unit	Normal	Emergency
static pressure, P_s	Pa	1.013×10^5	1.013×10^5

3) 벽 경계조건

덕트와 연돌의 외벽은 미끄럼 방지조건과 표준 벽면 함수

(standard wall function)이 적용하여 계산하였다.

3.4 수치해석 및 계산 알고리즘

본 연구는 배연탈활 설비의 유동 특성을 전산유체역학 해석하기 위하여 국내외에서 유동해석을 위해 사용하여 적합한 것으로 검증된 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+를 사용하여 수치해석을 수행하였다[8]. 계산 영역을 수치모델의 적용에 적합하도록 여러 개의 작은 영역으로 분할된 격자를 이용하였다. 모든 물리량들은 이 제어체적들의 중심에 저장되며 이렇게 각 제어체적에 보존법칙을 적용한 유한 체적법을 이용하였다.

사용된 전산유체역학 코드인 CFD-ACE+의 경우 SIMPLE 계열의 알고리즘을 채택하고 있으며 속도항에서 각각의 성분을 따로 푸는 방법을 이용한다. 대류항의 차분화 기법으로 1차 상류차분도식을 사용하였으며, 수렴율과 안정성을 향상시키기 위하여 각 변수에 대하여 하향 이완을 수행하였다. 수렴판정은 각 변수의 잉여값이 10⁻⁴이하이면 수렴한 것으로 판정하였다.

IV. 수치 해석 및 설계 결과

정상운전과 비상운전을 하는 경우 공통으로 이용되는 분기덕트에 안내깃을 설치함으로써 분기 덕트와 연결되는 덕트를 통과하는 배기가스의 유동균일도와 압력손실의 미치는 영향을 고찰하였다. 덕트 내부에서 유동 균일도를 정량적으로 분석하기 위하여 주요 검토단면에서 식(6)로 정의된 %RMS (Root mean square)를 계산하여 유동 균일도를 계산하였다. %RMS는 낮을수록 균일한 유동으로 판단된다.

$$u_{rms} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\bar{u} - u_i)^2} \times 100 \quad (6)$$

식(6)에서 n은 측정점의 수, u_i 는 측정점 i 에서 속도이며, \bar{u} 는 평균속도이다.

덕트에서 발생하는 압력손실은 식(7)로 정의되는 덕트 입구과 출구사이의 전압 차이로 계산하였다. 압력손실은 낮을수록 에너지손실이 적은 유동으로 판단한다.

$$\nabla P = P_{T,in} - P_{T,out} \quad (7)$$

식(7)에서 $P_{T,in}$ 은 해석 입구조건에서 평균 전압이며,

$P_{T,out}$ 이다.

4.1 배기가스 유동 특성

4.1.1 유선 비교

그림 6은 정상운전과 비상운전을 하는 경우 공통으로 이용되는 분기 덕트, 그림 4 ①에 안내깃을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대해서 유선분포를 비교한 그림이다. 그림 4(a)와 같이 분기덕트에 안내깃을 설치하지 않으면 그림 6(a)의 분기덕트를 통과한 배기가스가 덕트의 상부 ③로 치우쳐 흐른다. 이러한 덕트 내부에서 유동의 쏠림 현상은 그림 4(b)와 같이 분기덕트에 안내깃을 설치하면 그림 6(b)와 같이 없어져 배기가스는 덕트를 매우 균일하게 통과한다.

그림 7은 배연탈활설비를 비상운전할 때 유인 송풍팬 출구에서 연돌 구간의 배기가스의 유선 분포를 나타낸 그림이다. 그림 7(a)는 공통 분기관에 안내깃을 설치하지 않은 경우는 유인 송풍팬에서 유입되는 배기가스가 공통 분기관의 천정에 부딪히면서 연돌로 유입된다. 따라서 연돌로 유입될 때 유선 분포는 덕트의 상부에서 조밀하며 덕트의 하부는 희박하다.

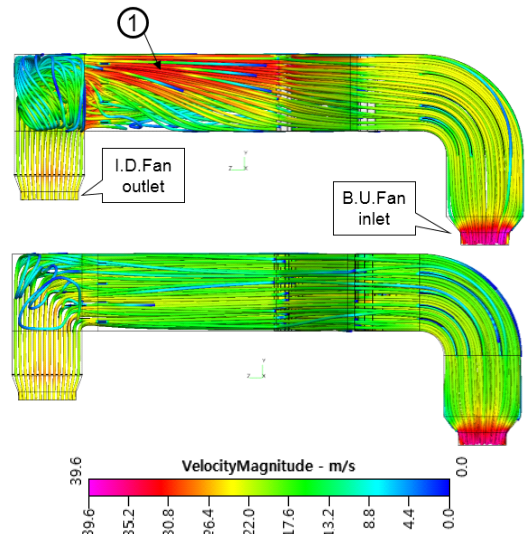


그림 6. 유인팬 출구에서 송압팬 입구까지 유선 분포 (정상운전)
Fig. 6. Flow line distribution of I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet (normal operation)

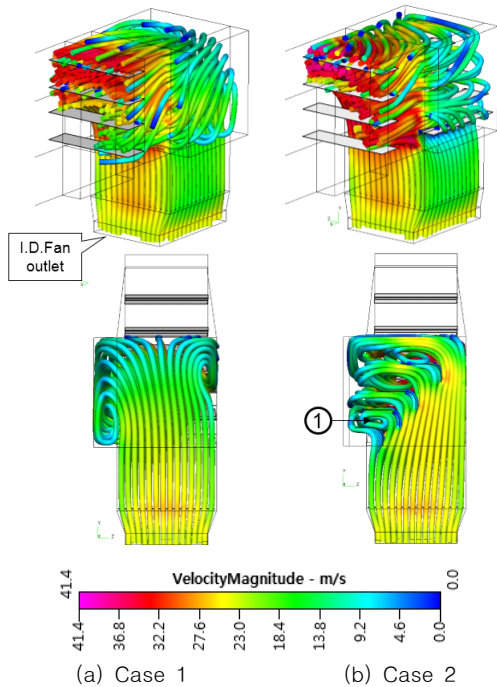


그림 7. 유인 송풍팬에서 연돌입구까지 유선분포(비상 운전)
 Fig. 7. Path line of I.D.Fan outlet to stact inlet (emergency operation)

공통 분기관에 안내깃을 설치하면 그림 7 (b)의 ①과 같이 배기가스는 유인 송풍 팬에서부터 상승하면서 높이에 따라 4 개의 안내깃에 부딪혀 승압팬 입구로 진행되는 덕트의 댐퍼에 부딪혀 돌아 나와서 연돌로 유입된다. 따라서 연돌로 유입될 때 유선분포는 승압팬 덕트의 댐퍼가 있는 측벽에서 상부에서 조밀하며 반대쪽 측벽의 하부는 희박하다. 그림 7 (b)에서 배기가스의 유속이 40m/s로 빠른 구간이 존재하고 안내깃가 벽에 지지되지 못하는 부위라서 배연탈황 설비가 비정상상태로 운전되는 시간이 길어지면 이 부위에 안내깃의 파손이 우려된다.

4.1.2 유속 분포 비교

그림 8과 9는 탈황설비가 정상운전하는 경우에 안내깃이 설치되는 곡관덕트의 1/2 단면과 승압팬의 입구에서 배기가스의 유속을 나타낸 그림이다. 그림 8, 9의 (a)단면은 공통 덕트의 유속을 나타낸 그림으로 그림 8(a)와 같이 안내깃이 설치되지 않으면 유인 송풍팬에서 유입되는 배기가스는 덕트의 천정부까지 상승하여 승압팬 덕트 입구로 유입된다. 공통 덕트에 그림 9(b)와 같이 4개의 안내깃을 설치하면 배기가스는 안내깃을 따라 균일하게 통과한다.

표 5는 안내깃이 없는 Case 1과 안내깃이 있는 Case 2에

서 2~6단면에서 유동 균일도를 비교한 표이다. 표에서 단면 2, 3 구간만 공통 덕트의 안내깃이 덕트의 유동 균일도를 크게 향상시키는 영향을 주는 것으로 판단되며 승압팬 입구에서의 유동 균일도는 공통 덕트에 안내깃이 설치되면서 2%내외로 좋아지는 효과가 있다.

그림 10과 11은 탈황설비가 비상운전을하는 경우에 유인 송풍팬 입구에서 연돌 입구까지의 덕트 구간에 안내깃이 설치되는 곡관덕트의 1/2 단면과 승압팬의 입구에서 배기가스의 유속을 나타낸 그림이다. 그림 10, 11의 (a)단면은 공통 덕트의 유속을 나타낸 그림으로 그림 10(a)와 같이 안내깃이 설치되지 않으면 유인 송풍팬에서 유입되는 배기가스는 덕트의 천정부까지 상승하여 연돌로 연결되는 덕트 입구로 유입된다. 공통 덕트에 그림 10(b)와 같이 4개의 안내깃을 설치하면 배기가스는 유인 송풍팬에서부터 상승하면서 높이에 따라 4개의 안내깃에 부딪혀 승압팬 입구로 진행되는 덕트의 댐퍼에 부딪혀 돌아 나와서 연돌로 유입된다.

표 6은 안내깃이 없는 Case 1과 안내깃이 있는 Case 2에서 2~6단면에서 유동균일도를 비교한 표이다. 표 6에서 공통분기 덕트에 가까운 단면 2를 제외하면 안내깃의 유무가 덕트의 유동균일도에 영향을 거의 주지 않는 것으로 판단된다.

4.1.3 압력 손실 특성

그림 12는 정상운전의 경우에 유인 송풍기 출구에서 승압 팬 입구까지 전압 분포를 나타낸 그림이다. 공통 덕트 구간에 안내깃을 설치하면 그림 12 (a)와 (b)의 전압분포를 비교로부터 알 수 있듯이 공통 덕트와 연결되는 덕트 ①의 구간에서 압력손실을 줄이 수 있다. 표7에 의하면 공통 덕트에 안내깃을 설치하면 유인송풍팬 출구에서 승압팬 입구까지 압력손실을 설치하기 전보다 174.00Pa 줄일 수 있다.

표 5. 유인송풍기 출구 덕트의 검토단면에서 유속균일도 비교(정상운전)
 Table 5. Comparison of flow uniformity in the duct cross-section from I.D.Fan outlet to B.U.Fan (normal operation)

Value	Case1			Case2		
	Mean Velocity	RMS	Point	Mean Velocity	RMS	Point
Unit	m/s	%	ea	m/s	%	ea
2	22.27	42.48	1,890	19.81	24.92	1,890
3	17.42	45.35	1,862	17.44	24.07	1,862
4	17.34	31.14	1,862	17.23	31.01	1,862
5	19.59	12.66	2,226	19.98	10.12	2,226
6	34.86	6.92	2,058	34.82	4.84	2,058

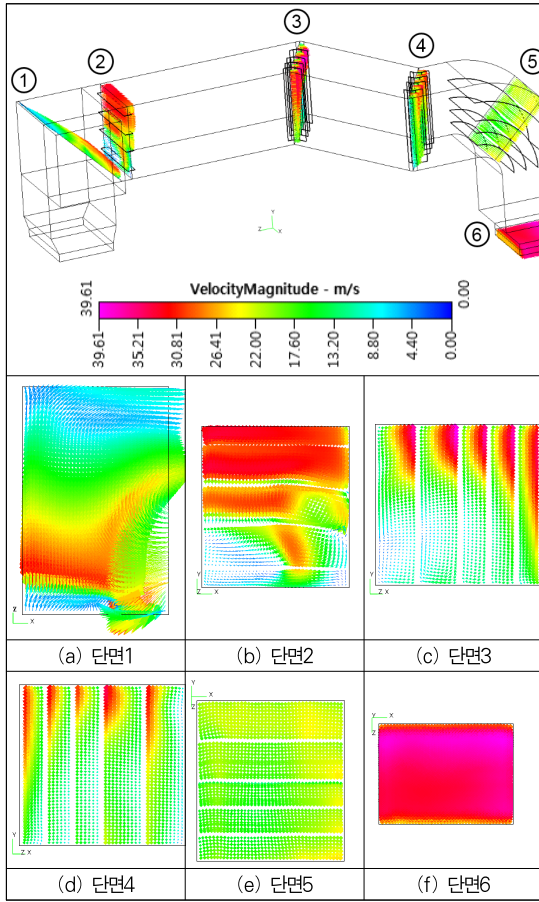


그림 8. 공통 덕트에 안내깃이 없는 경우의 유인 송풍팬 출구에서 송압팬 입구까지 유속 분포
 Fig. 8. Velocity distribution of I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet without the guide vane at the common duct

표 6. 유인송풍기 출구에서 연돌 구간에 덕트의 검토탄면에서 유속균일도 비교(비상운전)
 Table 6. Comparison of flow uniformity in the duct cross-section from I.D.Fan outlet to stack inlet (emergency operation)

Value	Case1			Case2		
	Mean Velocity	RMS	Point	Mean Velocity	RMS	Point
Unit	m/s	%	ea	m/s	%	ea
2	23.75	36.33	1,271	24.58	42.18	5,108
3	21.86	49.06	1,147	23.79	50.14	1,147
4	19.41	45.58	1,147	19.23	39.30	1,147
5	20.26	32.50	1,178	20.72	22.71	1,178
6	19.96	33.90	1,271	20.06	23.42	1,271

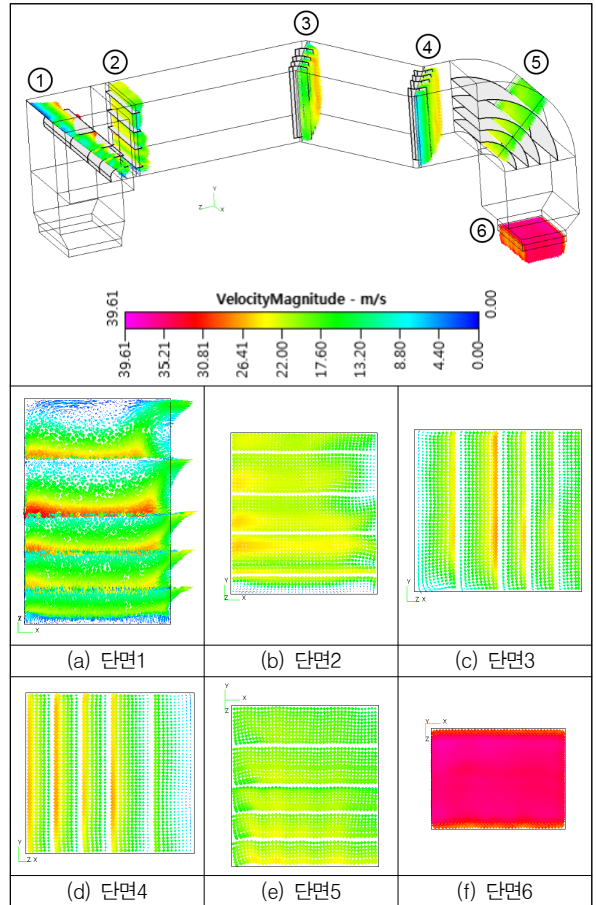


그림 9. 공통 덕트에 안내깃이 있는 경우의 유인 송풍팬 출구에서 송압팬 입구까지 유속 분포
 Fig. 9. Velocity distribution of I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet with the guide vane at the common duct

표 7. 안내깃의 유무에 따른 압력손실 비교
 Table 7. Comparison of the pressure loss with or without the guide vane

Operating condition	Section	Unit	Case1	Case2	1-2
Normal	ID fan outlet ~BU fan inlet	pa	489.33	315.33	174.00
Emergency	ID fan outlet ~Stack inlet	pa	343.97	431.45	-87.48

그림 13은 비상운전의 경우에 유인 송풍기 출구에서 연돌 입구까지 전압 분포를 나타낸 그림이다. 그림 13 (a)와 (b)의 전압분포를 비교로부터 알 수 있듯이 정상운전시에도 유동을 균일하게 유지할 목적으로 설치된 공통 덕트의 안내깃 때문에 그림 13(b)와 같이 공통 덕트와 연결되는 덕트 ①의 구간에

서 압력손실이 증가된다. 표7에 의하면 공통 덕트에 안내깃을 설치하면 유인송풍팬 출구에서 연돌 입구까지 압력손실이 설치하기 전보다 87.48 Pa 증가한다.

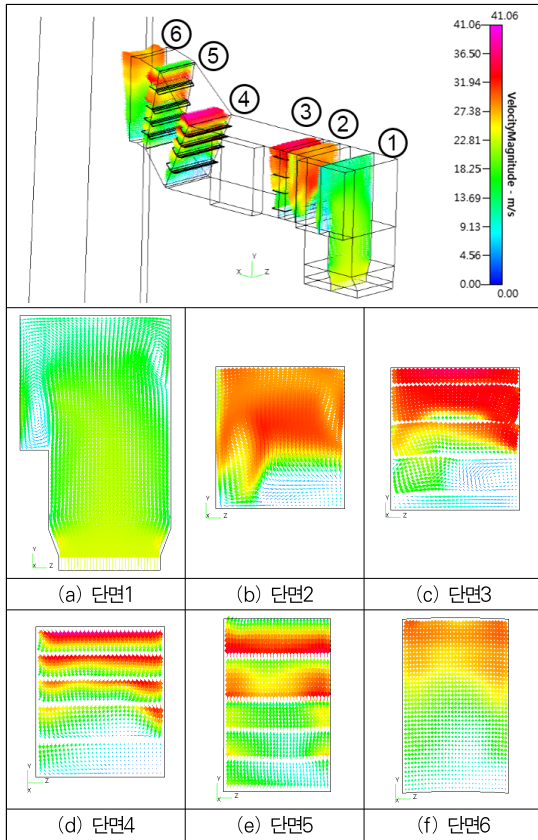


그림 10. 공통 덕트에 안내깃이 없는 경우의 유인 송풍팬 출구에서 연돌 입구까지 유속 분포(정상운전)
Fig. 10. Velocity distribution of I.D.Fan outlet to stack inlet without the guide vane at the common duct

V. 결 론

본 논문에서는 배연탈황 설비 중에서 정상운전과 비상운전을 하는 경우 공통으로 이용되는 분기 덕트에서 안내깃을 설치하지 않는 경우와 설치하는 경우에 연결 덕트를 통과하는 배기가스의 유동균일도와 압력손실에 미치는 영향을 고찰하였다. A발전소의 배연탈황설비 중 정상운전과 비정상운전에서 공통 덕트가 적용되는 구간은 유인 송풍기 출구구간으로 정상운전하는 경우에는 유인 송풍팬 출구에서 송압팬 입구로 연결되는 덕트로 이용되고 비정상운전인 경우에는 유인 송풍팬 출구에서 연돌입구로 연결되는 덕트 구간이다. 일차적으로 정

상운전을 기준으로 유인 송풍기에서 송압팬 출구 구간의 유동에 적합하도록 공통 덕트구간의 안내깃을 제안하고 공통 덕트구간의 안내깃이 비상운전 시에 무리가 없는지 판단하기 위하여 유인 송풍기에서 연돌 입구 구간의 난류 유동특성을 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+를 사용하여 전산유체역학 기법으로 수치 해석을 수행하였다. 정상운전 구간인 유인송풍기 출구에서 송압팬 입구 덕트 구간에 공통 덕트의 안내깃을 설치함으로써 공통 덕트와 연결되는 دم퍼를 통과하는 배기가스의 유동 균일도를 설치하지 않은 경우와 비교하여 17.56 RMS% 내외로 향상시켰으며 이 구간의 압력손실은 174.00Pa 줄일 수 있었다.

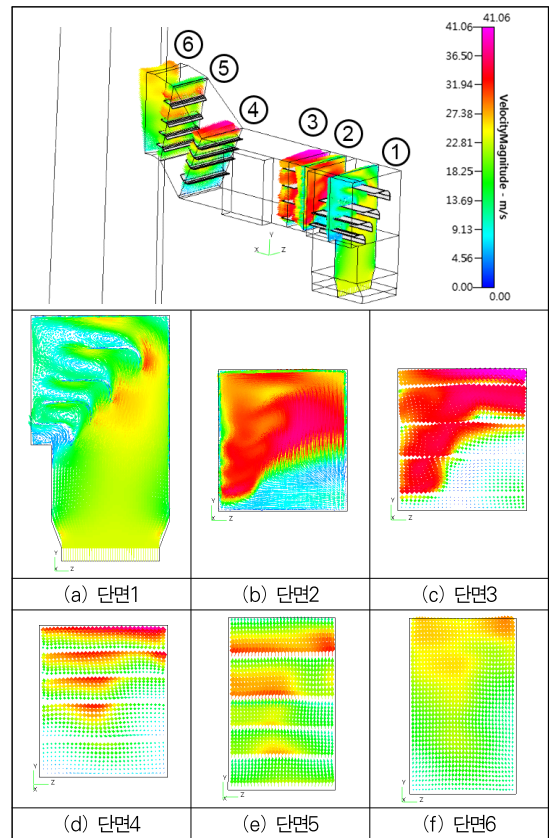


그림 11. 공통 덕트에 안내깃이 없는 경우의 유인 송풍팬 출구에서 연돌 입구까지 유속 분포(비상운전)
Fig. 11. Velocity distribution of I.D.Fan outlet to stack inlet with the guide vane at the common duct (emergency operation)

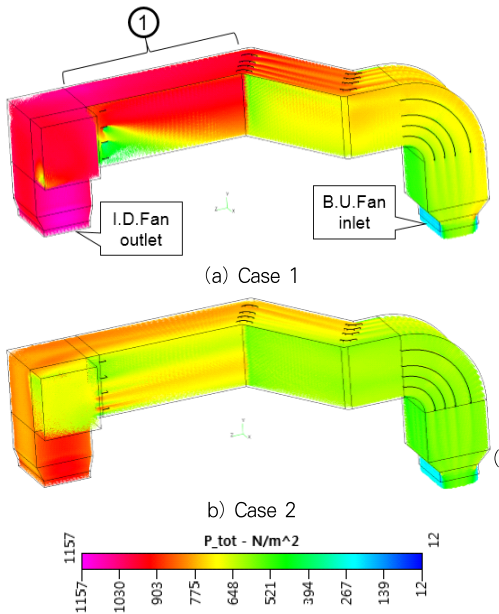


그림 12. 유인송풍팬 출구에서 송압팬 입구까지 전압 분포(정상운전)
 Fig. 12. Total pressure distribution from I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet (normal operation)

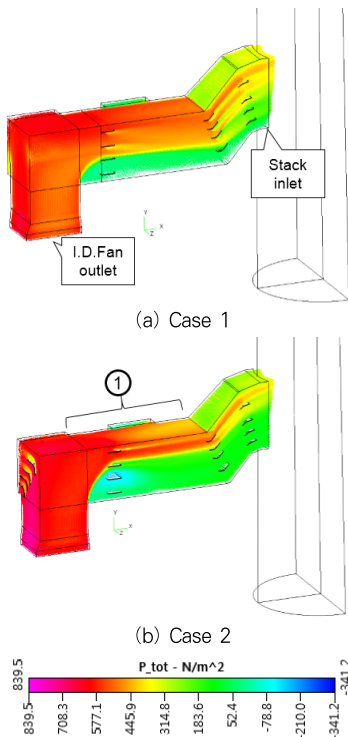


그림 13. 유인송풍팬 출구에서 연돌 입구까지 전압 분포(비상운전)
 Fig. 13. Total pressure distribution of I.D.Fan outlet to stack inlet (emergency operation)

정상운전의 유동특성을 개선시키기 위하여 설치된 공통 덕트의 안내깃은 비상운전시에 배기가스의 유동 균일도는 공통 덕트와 연결된 댐퍼를 지날 때를 제외하고 크게 변화가 없으나 이 구간에서 압력손실은 87.48Pa가 증가되는 것으로 계산되었다. 이를 통하여 정상운전의 유동특성을 향상시키고 비상운전을 할 때도 덕트를 안전하게 사용할 수 있는 공통 덕트의 안내깃을 설계할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년 동양미래대학교 학술연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. Kang, S. Lee, W. Jung, S. Chung., Y. Yun, S. Jo, Y. Park., J. Baek, "Performance of a coal gasification pilot plant with hot fuel gas desulfurization," J. KICChE, Vol.30, No.1, pp.67~72, 2013.
- [2] J. Hwang, S. Choi, T. Chung, "Numerical analysis of the energy-saving tray absorber of flue-gas desulfurization systems," J. KSME B, Vol.34, No.8, pp. 775~782, 2010.
- [3] Y. Li, C. You, "Experimental and model investigation on the mass balance of a dry circulating fluidized bed for flue gas desulfurization system," KJChE, Vol.28, No.9, pp.1956~1963, 2011.
- [4] G. Zhang, Y. Du, Y. Zhang, "Desulfurization reaction model and experimental analysis of high sulfur coal under hydrogen atmosphere," J. I&EC, Vol.20, No.2, pp.487~493, 2014.
- [5] G. Aurora, A.M. Jose, I. Angel, "Mechanistical and non-linear modeling approaches to in duct desulfurization, Chemical Engineering and Processing," pp. 709~715, 2005.
- [6] S. Sugiyama, M. Yamamoto, H. Nishikawa, Y. Oda, "Numerical investigations on fully-developed and unsteady flows in a curved duct," JSME, Part B, Vol.57, pp. 18~24, 1991.

- [7] S. Lee, C. Kim, W. Lee, "CFD Explanation and Verification of Multi Inner Stage Cyclone for the Particle Removal," J. KSCI, Vol.18, No.1, pp.149~156, 2013.
- [8] W. Hwang, K. Lee, Y. Cho, "Optimization of the Design of Large Ducts with the Space Constraint in 500MW Power Plant," J. Env. Sci., Vol.18, No.7, pp. 755~765, 2009.

저 자 소 개



황 우 현
 1990: 한국과학기술원
 화학공학과 공학석사
 1997: 서울대학교
 화학공학과 공학박사
 현 재: 동양미래대학교
 로봇자동화공학부 교수
 관심분야: 공장자동화, 교육용 로봇
 Email : priwoo@gmail.com



이 경 옥
 1991: 한국과학기술원
 화학공학과 공학석사
 현 재: 경기과학기술대학교
 청정환경과 부교수
 관심분야: CFD
 Email : kolee@gtec.ac.kr