

500MW 발전소에서 협소 공간 내 대형 덕트 설계의 최적화

황우현 · 이경옥* · 조용기**

동양공업전문대학 자동화시스템과, *경기공업대학 청정환경과, **한라산업개발(주) 기전기술팀
(2009년 3월 31일 접수; 2009년 4월 30일 수정; 2009년 6월 6일 채택)

Optimization of the Design of Large Ducts with the Space Constraint in 500MW Power Plant

Woo-Hyeon Hwang, Kyung-Ok Lee* and Yong Ki Cho**

Department of Automation System, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea

*Department of Cleaner Production Technology, Kyonggi Institute of Technology, Kyonggi-do 429-792, Korea

**HALLA Energy and Environment, Seoul 138-811, Korea

(Manuscript received 31 March, 2009; revised 30 April, 2009; accepted 6 June, 2009)

Abstract

Some sections of the exhaust system to determine the shape of the duct is to suffer the difficulties by space constraints to install new equipment of the environment post-treatment for existing operation of the power plants. In this paper the large duct in flue gas desulfurization equipments of the 500MW coal-fired power plant on the current operation is numerically analyzed from induced draft fan exit to booster up fan inlet section which is in the narrow space of the exhaust system with four times bending and is connected to emergency duct to bypass the exhaust gas on the emergency operation. The procedure and method using computational fluid dynamics are proposed to maintain the stability of the guide vane with the uniform flow and a minimum pressure loss of exhaust gas in the case of normal and emergency operation between the direction of the flow of exhaust gas duct at different.

Key Words : Guide vane, Computational fluid dynamics, Power plant, Flue gas desulfurization, Emergency duct

1. 서 론

환경에 대한 중요성이 커져 가면서 대기환경기준이 국내외적으로 더욱 강화되고 있다. 특히 대기오염 배출원의 허용기준을 단계별로 대폭 강화하면서 화석연료를 사용하고 있는 발전소 및 산업시설에는 배출가스 방지시설에 대한 요구가 날로 증가하고

있다. 발전소에서 배출되는 대기환경 물질로는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 먼지(dust) 등이 있고, 이를 제거하기 위해 탈황설비, 탈질설비, 전기집진기 등 방지시설을 설치하여 이들 환경물질의 대부분을 제거하고 있다. 배연탈황(FGD; Flue Gas Desulfurization) 설비는 유황분이 연소되어 발생한 배기가스 중의 황산화물을 물리 화학적인 방법으로 제거하는 장치이며, 배기가스 계통, 석회석 취급계통, 석고 취급 계통으로 나눈다¹⁾.

배연탈황 공정은 흡수제의 형태와 흡습수제 회수 여부에 따라 분류하며 전 세계적으로 가장 널리 상

Corresponding Author : Woo-Hyeon Hwang, Department of automation systems, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea
Phone: +82-2-2610-1837
E-mail: hwangwh@dongyang.ac.kr

용화되어 있는 처리공정은 비재생 습식 석회석-석고 공정으로 전체 설치 용량의 80% 이상을 점유하고 있는 것으로 알려져 있고 국내 화력 발전소에도 모두 같은 공정이다²⁾.

배연탈황 설비에서 배기가스의 유동 흐름이 균일하지 않거나 압력손실이 크게 나타나는 경우 가이드 배인을 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 재열기 출구와 덕트 냉각기 내의 유동에 대한 연구를 수행하여 최적의 배인의 형상을 구하는 연구를 수행한바 있다³⁾.

전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)이란 컴퓨터 수치 계산으로 설비 내부에서 일어나는 유체의 유동과 열 및 물질 전달을 계산하여 각종 설비 내부를 해석하여 최적화된 설계를 수행할 수 있는 데이터를 확보할 수 있는 유용한 도구이다⁴⁾. 전산유체역학 해석을 통하여 국내외에서 이미 탈황설비의 유동해석을 위해 적합한 것으로 검증된 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+ 2008(CFDRC사, 미국)를 사용하여 본 연구의 대상에 대한 수치해석을 수행하고자 한다⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서는 현재 가동 중인 500MW급 A 석탄 화력발전소에 소요되는 배연탈황 설비 중에서 정상 운전과 비상운전에 공동으로 사용되는 덕트 구간을 포함하는 I.D.Fan(Induced Draft Fan) 출구에서 B.U.Fan(Booster Up Fan) 입구 덕트구간에 대해 난류 유동장을 전산유체역학기법으로 수치 해석하고 배기가스 계통 설비의 유동 특성을 분석하여 협소 공간 내 대형 덕트 설계를 최적화하고자 한다. 기존 가동 중인 발전소에 새로운 환경 후처리 설비를 설치하는 경우에는 공간적 제약으로 인하여 배기가스 계통 중 일부 구간의 덕트 형상을 결정할 때 어려움을 겪게 된다⁸⁾.

2. 배연탈황 설비의 배기가스 계통의 해석범위

2.1. 수치해석 영역

Fig. 1은 현재 가동 중인 500MW급 A 석탄화력발전소에 소요되는 배연탈황 설비 소요되는 계통도이다.

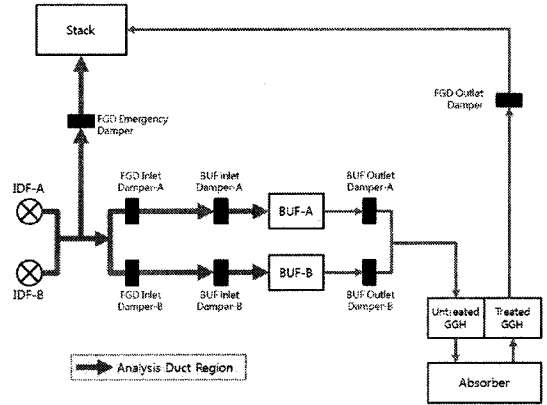


Fig. 1. Flow diagram of the flue gas in the FGD system.

배기가스가 정상적으로 처리되는 경우는 황산화물이 포함된 배기가스가 전기집진기를 거치면서 비산재가 제거되며 2개의 I.D.Fan을 지나게 되고, 배기가스는 탈황설비를 통과할 수 있도록 압력을 상승시키기 위한 2기의 B.U.Fan을 거쳐 Untreated GGH (Gas Gas Heater)에서 고온의 배기가스가 저온으로 냉각되어 흡수탑으로 유입된다. 일반적으로 GGH는 1 RPM 이내의 저속으로 회전하면서 고온과 저온의 배기가스의 열교환을 일으키는 부속설비로 Untreated GGH를 거치게 되는 배기가스는 GGH의 회전 운동에 영향을 받으면서 덕트 냉각기로 유입된 후 배연탈황이 일어나는 흡수탑으로 유입된다. 배연탈황과정을 거친 처리가스(Clean Gas)는 Treated GGH를 거쳐 온도가 상승된 후 연돌(stack)로 빠져나간다.

또한 배연탈황설비의 이상으로 비정상적으로 운전되는 경우는 2기의 I.D.Fan을 통과한 배기가스는 바이패스(bypass)되어 GGH와 흡수탑을 거치지 않고 바로 연돌로 빠져나간다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 해석덕트 영역으로 표시된 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트와 비상덕트 구간의 평면도와 3차원 도면이다. 해석덕트 영역에서 배연탈황설비가 정상 운전하는 경우에는 FGD 비상댐퍼가 완전히 닫히고 FGD 입구댐퍼가 완전히 열리면서 배기가스는 I.D.Fan -A 출구에서 Fig. 2 ①의 분기관까지 +Y방향으로 상승하여 3차원 도면의 -Z 방향으로 휘어 B.U.Fan-A 입구로 유동한다. 그러나 비상운전 하는 경우에는 FGD 비상댐퍼(emergency damper)가 완전히 열리고 FGD 입구댐퍼가 완전히

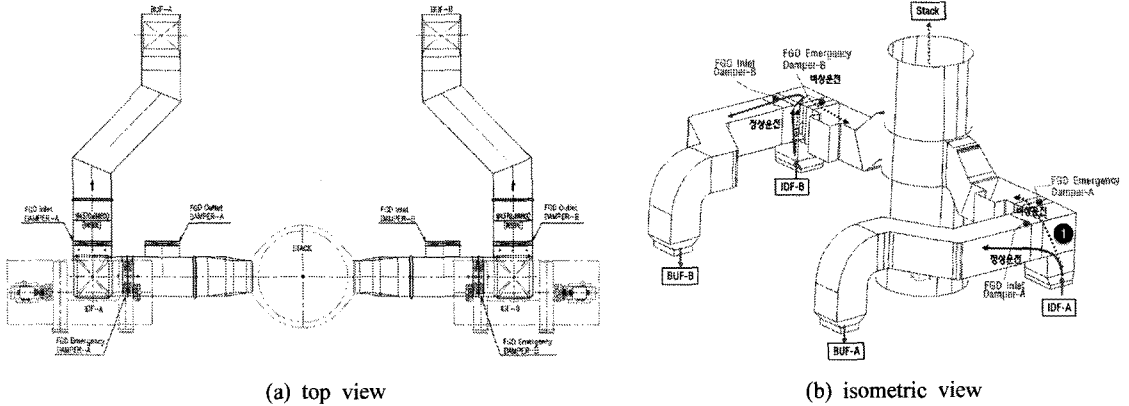


Fig. 2. The duct shape for FGD emergency from I.D.Fan exit to B.U.Fan inlet.

닫히면서 배기가스는 I.D. Fan-A 출구에서 Fig. 2 ①의 분기관까지 +Y방향으로 상승하여 3차원 도면의 +X방향으로 휘어 연돌 입구로 유동한다.

본 논문의 수치해석 영역은 Fig. 2 ①의 분기관에 Fig. 3과 Table 1과 같이 6가지 다른 형상의 안내깃을 설치한 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트 구간과 I.D.Fan 출구에서 연돌 입구 구간의 비상덕트

(Emergency Duct) 구간이다. 즉, Case 1의 수치해석 영역은 Fig. 2 ①의 분기관 안내깃을 설치하지 않은 것이며, Case 2의 수치해석 영역은 Fig. 2 ①과 같은 분기관에 Fig. 3과 같이 안내깃 [A(300)-B(R500)-C(1200)]을 4개 설치한 경우이다.

3. 수치 해석 방법

본 연구는 정상운전과 비상운전에 공동으로 사용되는 덕트구간을 포함하는 I.D.Fan 출구에서 B.U. Fan 입구 덕트 구간과 비상덕트 구간에서 배기가스의 유동특성을 CFDRC사 CFD-ACE+2008 소프트웨어를 사용해 전산유체해석을 수행하였다.

3.1. 덕트 해석에 적용된 가정

현재 가동 중인 500MW급 A 석탄화력발전소에 소요되는 배연탈황 설비의 배기가스 계통 중 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트와 I.D. Fan 출구에서 연돌 입구 구간의 비상덕트에서 배기가스의 특성은 다음과 같이 가정한다.

- 1) 배기가스는 속도, 압력, 밀도, 온도 등이 시간이 경과해도 일정한 정상류이다.
- 2) 배기가스는 압력에 관계없이 체적, 온도, 밀도 등이 일정한 비압축성 유체이다.
- 3) 배기가스는 점도가 속도구배에 따라 변하지 않는 뉴턴 유체이다.
- 4) 배기가스는 덕트의 전 구간에서 온도의 변화가 없다.
- 5) 덕트 전 구간에서 화학반응이 일어나지 않는다.

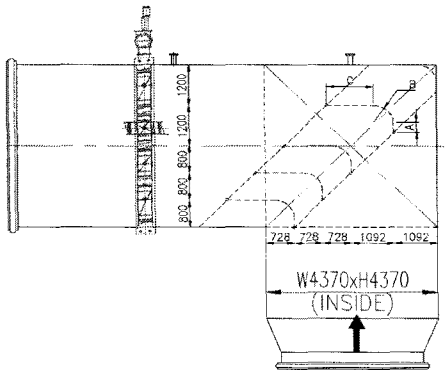


Fig. 3. Guide vane for duct section from I.D.Fan exit to B.U. Fan inlet.

Table 1. Shape parameters of guide vane from I.D.Fan exit to B.U.Fan inlet

Case	1	2	3	4	5	6
A (mm)	0	300	0	0	0	0
B (mm)	0	R500	R500	R500	R500	R500
C (mm)	0	1200	1200	600	300	0
No. of guide vane(ea)	4	4	4	4	4	4

6) 배기가스의 Body force에 의한 운동량 변화는 무시한다.

7) 두 덕트 입구인 I.D.Fan 출구에서 배기가스 유속은 유동의 수직단면에서 일정하다.

8) 벽면에서 배기가스는 미끄럼 방지조건(No slip boundary condition)을 만족한다.

3.2. 덕트 해석을 위한 격자 생성

I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트와 비상 덕트는 수치모델의 적용이 적합하도록 여러 개의 작은 영역으로 나누는 격자생성 과정에서 계산 영역은 구간별로 격자생성에 편의성에 따라 Table 2와 같이 직육면체 모양의 정렬격자(structure grid), 사면체 모양의 비정렬격자(unstructure grid), 프리즘 형태의 격자를 혼용하는 혼성격자(hybrid grid)로 구성되었다.

3.3. 덕트 해석에 적용된 방정식과 모델

배연탈황 설비의 중 배기가스 계통에서 배기가스의 유동장과 압력 분포 값을 3차원으로 계산하기 위하여 질량보존방정식, 운동량보존방정식과 Launder와 Spalding⁹⁾에 의해 정의된 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델식에서 요구되는 상수 값은 Table 3과 같다.

3.4. 수치해석 조건

3.4.1. 보일러 운전 부하에 따른 배기가스 물성 값

500 MW급 A석탄화력발전소를 정격(Nominal Rating, NR) 보일러 운전부하 조건에서 배연탈황 설비를 운전하는 경우에 대해서 I.D.Fan 출구에서

B.U.Fan 입구 덕트와 비상덕트에서 배기가스 물성 값은 Table 4와 같다.

3.4.2. 정격 보일러 운전 부하에서 경계조건

3.4.2.1. 입구 조건

정격 보일러 운전부하에서 두 덕트의 입구, I.D.Fan 출구의 유속은 Table 4와 같이 I.D. Fan 1기로 배출되는 유량을 유체 유동 방향에 수직단면의 면적으로 나눈 값으로 결정하였다. 또한 이 운전부하에서 I.D.Fan 출구에서 난류 운동 에너지 k 와 난류 운동에너지 소산율 ϵ 은 입구단면에서 유속과 등가지름 D_H 로부터 식(1)과 식(2)로 각각 계산하였다.

- 입구(m)에서 난류 운동에너지(k_m);

$$k_{\epsilon} = \frac{3}{2}(U \times V_{n,\epsilon})^2 = \frac{3}{2}(0.02 \times V_{n,\epsilon})^2 \quad (1)$$

- 입구에서 난류운동에너지 소산율(ϵ_m);

$$\epsilon_{\epsilon} = \frac{C_{\mu}^{0.75} k^2}{0.4 D_h} \quad (2)$$

여기서 C_{μ} 는 무차원 모델상수이다.

정격 보일러 운전부하에서 두 덕트의 배기가스 입구, I.D.Fan 출구에서 경계조건인 유속과 난류 운동 에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 은 Table 4와 같다.

3.4.2.2. 출구 조건

정격 보일러 운전부하에서 해석하고자하는 두 덕트 구간의 출구, B.U.Fan 입구와 연돌 입구에서 압력이 초기 덕트의 정압과 동일하다는 조건으로 설정하였다. 또한 두 덕트 출구로 외부 기체가 유입되는 경우에 요구되는 난류 운동 에너지 k 와 난류 운동에너지 소산율 ϵ 은 어떤 값을 설정하여도 이 두

Table 2. Volume and Number of cells in duct section

Duct	I.D.Fan-B.U.Fan duct (Case 1~Case 6)	Emergency duct
Volume (m^3)	996.33	2074.05
No. of Cells	348,128 (prism+hexahedral)	403,578 (tetrahedral+prism+hexahedral)

Table 3. Standard $k-\epsilon$ turbulent model constant

C_{μ}	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_{ϵ}
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table 4. Physical properties and boundary conditions(BC) in emergency duct

Operation condition	Physical Property				Inlet BC			Outlet BC
	T	ρ	μ	Q_t	$V_{n,\epsilon}$	k_{ϵ}	ϵ_{ϵ}	$P_{s,out}$
	[K]	[kg/Am^3]	[$Pa \cdot sec$]	[Am^3/hr]	[m/sec]	[m^2/sec^2]	[m^2/sec^3]	[Pa]
NR	409.15	0.900	2.082×10^{-5}	2,440,661	19.2494	2.223×10^{-1}	9.094×10^{-3}	0

덕트의 유동특성에 영향이 없도록 출구에서 역류가 없도록 계산영역을 최적화하였다.

3.5. 수치해석 기법

본 논문에서 배연탈황설비의 덕트계통에서 유동 해석을 수행하기 위하여 상용 전산유체역학 코드인 CFD-ACE+2008를 사용하였다. 수치계산에서 압력장은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였으며 방정식의 대류항을 계산하기 위하여 1차 상류 차분스킴(1st order upwind differencing scheme)을 적용하였다. 속도항을 구하는 대수방정식의 계산은 CGS+Pre를, 압력 보정에 관련된 대수방정식의 계산은 AMG 솔버를 반복 행렬 솔버(Iterative Matrix Solver)로 선택하였다. 반복 계산시 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완(under relaxation)을 도입하였다. 수렴 조건은 각 제어체적인 셀에 적용된 보존방정식과 난류모델의 해를 구하는 알고리즘을 수행하는 동안 각 셀에서 이산화방정식의 해의 잔차(Residual)의 합이 10^{-4} 이하이면 수렴한 것으로 설정하였다.

4. 수치 해석 결과

수치해석의 첫 번째 단계는 탈황설비가 정상운전되는 경우에 배기가스가 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 구간의 덕트를 유동할 때 비상덕트와 겹치는 구간에 안내깃을 설치해야하는지를 판단하였다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 결정된 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트와 비상덕트가 겹치는 구간에 소요되는 안내깃의 형상이 탈황설비의 비상운전되는 경우에도 물리적으로 안전하지를 안내깃 전면과 후면에 걸리는 전압의 차로 판단하였다. 세 번째 단계는 배연탈황 설비가 정상 운전되는 경우에는 덕트 내부에서 유동이 균일하게 유지되고 압력손실이 최소가 되며 비상 운전되는 경우에는 안내깃이 물리적으로 안전하도록 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트와 비상덕트가 겹치는 구간에 소요되는 안내깃의 형상을 최적화 하였다.

4.1. 분기관 안내깃 유무에 따른 배기가스 유동 특성

4.1.1. 유속 분포

정격 보일러 운전부하에서 배연탈황설비가 정상

운전 되는 경우에 I.D.Fan 출구에서 B.U. Fan 입구 구간 중 비상덕트와 겹치는 구간에 안내깃을 설치하지 않은 Case 1과 안내깃 [A(300)-B(R500)-C(1200)]을 설치한 Case 2의 덕트에서 I.D.Fan의 출구를 지나가는 배기가스의 유선을 나타내면 Fig. 4와 같다.

안내깃을 설치하지 않은 Case 1의 경우에는 Fig. 4의 front view와 back view에서와 같이 I.D.Fan 출구에서 +Y방향으로 90° 상승한 배기가스는 +Z방향으로 90° 휘 때 배기가스가 덕트의 천정으로 치솟게 되나 상대적으로 덕트 바닥에서는 배기가스의 사각지대가 생성됨을 알 수 있다. FGD 입구뎀퍼와 압력센서가 설치된 천정부위로 배기가스 27 m/s의 속도로 부딪히게 됨으로 이들 부착기기에 좋지 않은 영향을 주게 될 것이다. 또한 I.D.Fan에서 +Y방향으로 90° 상승한 배기가스 중 일부의 유선은 +X방향으로 90°에 있는 FGD 비상뎀퍼 쪽을 치솟아 흐르다가 -X방향으로 되감아 흐르는 복잡한 경로이다.

반면 안내깃(A[300]-B[R500]-C[1200])을 설치한 Case 2의 경우에는 I.D.Fan 출구에서 +Y방향으로 90° 상승한 배기가스가 안내깃(A[300]-B[R500]-C[1200])의 영향으로 균일하게 분배되어 +Z방향으로 90° 휘어서 20m/s이내의 균일한 속도로 B.U.Fan 입구를 향해 유동되는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 Case 2의 top view로부터 I.D.Fan에서 +Y방향으로 90° 상승한 배기가스는 +X방향으로 90°에 있는 FGD 비상뎀퍼 쪽으로 거의 진행하지 않아 이 덕트 구간의 유선이 안내깃이 없는 경우에 비하여 단순하다.

따라서 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트의 분기관에서 안내깃은 탈황설비를 정상운전 할 때 배기가스의 균일한 유동특성을 갖도록 하기 위하여 반드시 설치해야 한다.

4.1.2. 압력 손실

I.D.Fan 출구 ~ B.U.Fan 입구 덕트 구간에서 압력손실은 B.U.Fan의 정격용량을 결정하는 주요한 인자이다. 배연탈황 설비가 정격 보일러 운전부하에서 정상가동 될 때 I.D.Fan 출구 ~ B.U.Fan 입구 덕트 구간의 분기관에 안내깃을 설치하지 않은 Case 1과 초기설계안 안내깃[A(300)-B(R500)-C(1200)]을 설치한 Case 2에 대한 총압 분포를 Fig. 5에 나타내

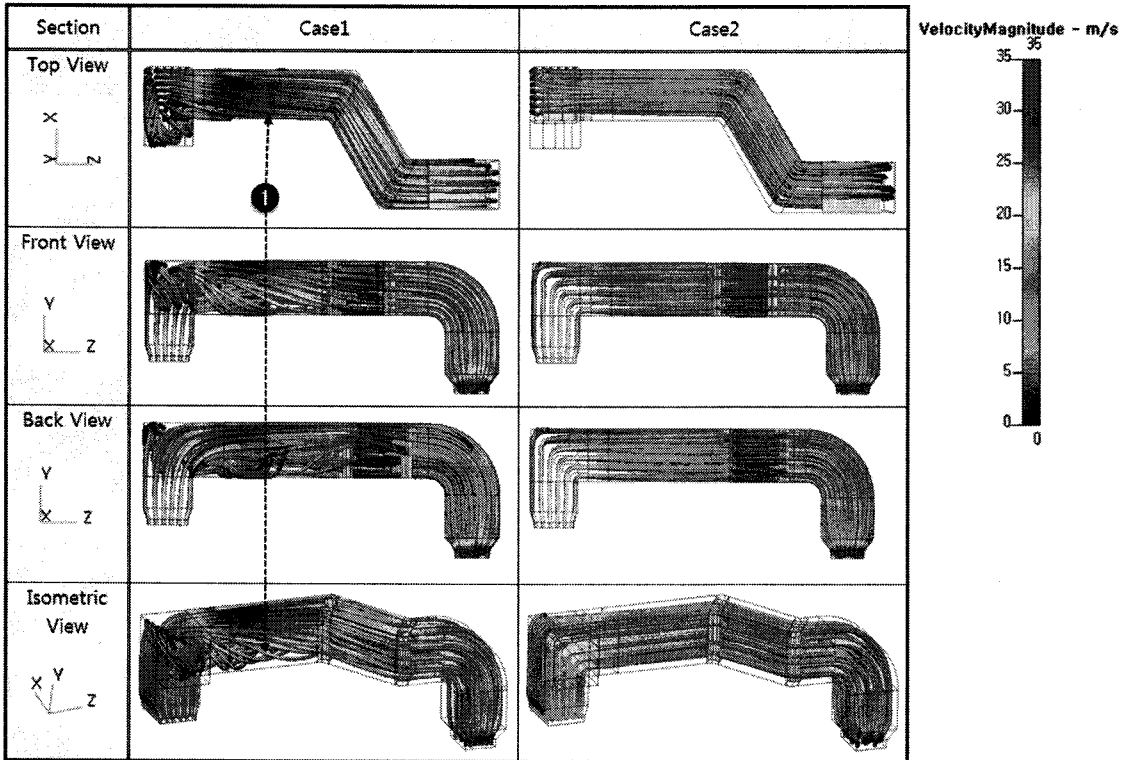


Fig. 4. Stream lines of I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet duct.

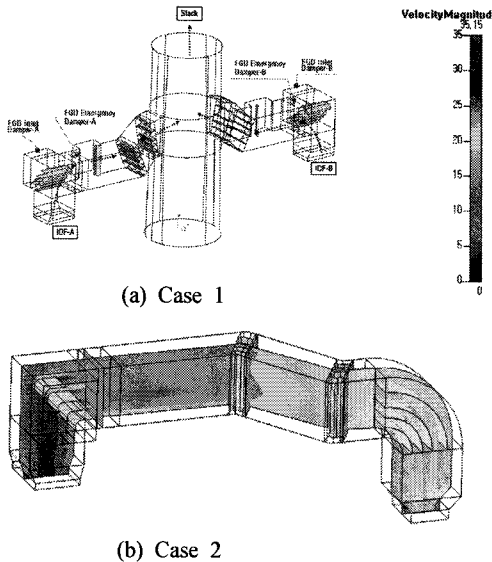


Fig. 5. Pressure drop distribution of I.D.Fan outlet to B.U.Fan inlet duct.

었다.

분기관에 안내깃을 함으로써 I.D.Fan 입구에서 FGD 입구덤퍼 ① 구간에서 압력손실을 상당히 줄일 수 있으며 ②, ③구간에서 덕트 천정으로 압력이 치우침 없이 균일함을 알 수 있었다.

4.2. 비상덕트의 분기관 안내깃 안전성 평가

Fig. 6과 같이 FGD 비상덤퍼는 완전히 열고 FGD 입구덤퍼를 완전히 닫고 배연탈황설비를 비상운전할 때 I.D.Fan-A출구에서 유입되는 배기가스는 Fig. 6의 ① 분기관까지 +Y방향으로 상승하여 3차원 도면의 +X방향으로 휘어 연돌 입구로 유동한다. 이때 비상덕트의 I.D.Fan 출구에서 연돌입구간의 분기관에 안내깃은 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트의 분기관에서 안내깃과 동일하다.

Fig. 7과 Fig. 8은 앞서 4.1절에서와 같이 두 덕트의 분기관에 Case 2의 안내깃(A[300]- B[R500]- C[1200]) 4개를 설치하는 경우에 비상덕트에서 I.D.Fan 출구를 통과하는 배기가스의 유선을 나타낸

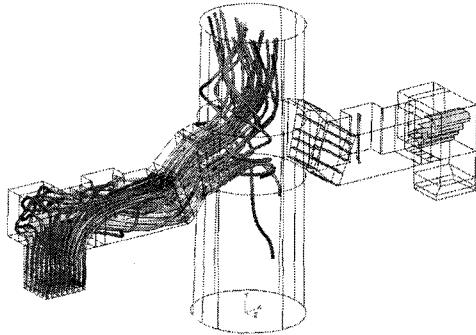


Fig. 6. Shape of emergency duct.

그림이다. I.D.Fan 출구를 통과하는 배기가스 중 Fig. 7의 ① 유선을 갖는 배기가스는 FGD 비상댐퍼 부근의 상부로 솟구치며 Fig. 7의 유선을 갖는 배기가스의 일부는 비상덕트의 FGD 입구댐퍼 쪽으로 진행하였다가 되돌아 나와 연돌으로 빠져나간다.

두 덕트의 분기관에 설치된 안내깃은 배연탈황설비가 정상 운전하는 경우에 배기가스가 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트를 균일하게 유동하도록 설계되었으므로 비상 운전하는 경우에 배기가스는 Fig. 7과 같이 I.D.Fan 출구에서 유입되는 배기가스가 균일하게 연돌로 진행되게 하는 역할은 특별히 하지 못한다. 오히려 배기가스의 유동방향과 다른 방향으로 안내깃이 설치되어 있기 때문에 빠른 속도로 배기가스가 유동되어 통과하는 경우에는 안내

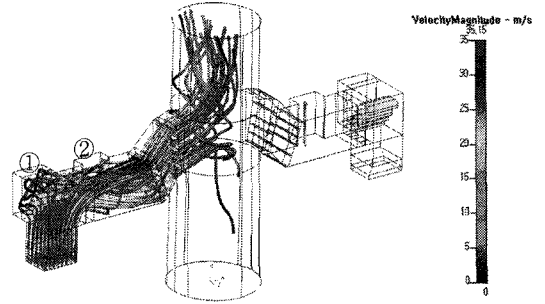


Fig. 7. Flow lines of I.D.Fan exit in emergency duct.

깃의 파손의 가능성을 배제 할 수 없다.

Fig. 8은 I.D.Fan의 단면의 위치별로 통과되는 배기가스의 유선에 대한 정면도와 측면도이다.

Fig. 8의 ①은 I.D.Fan 출구단면 중 -X방향 끝에 가까운 위치로 여기를 통과하는 배기가스는 FGD 입구댐퍼가 있는 -Z방향으로 흘러 +Z방향으로 되돌아 나와 연돌입구로 흘러나간다. Fig. 8의 ②와 ③의 위치를 통과하는 배기가스는 위치좌표의 Z값이 작을수록 Fig. 9의 하부 안내깃에 수직으로 닿아 유동 방향을 바꾼 다음에 안내깃 사이를 통과하여 연돌입구로 흘러나간다. 위치좌표의 Z값이 클수록 상부 안내깃에서 이러한 유동현상이 일어난다.

이러한 안내깃 사이를 통과해서 연돌로 향하는 배기가스의 유동 특성 때문에 발생할 수 있는 안내깃의 파손에 대한 가능성을 예측하기 위하여 Fig. 9

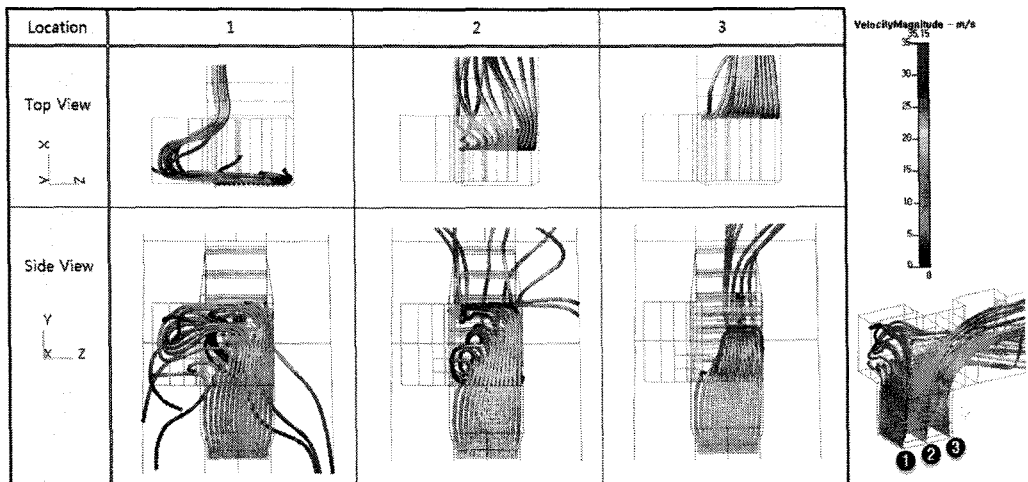


Fig. 8. Flow lines of exhaust gas in emergency duct.

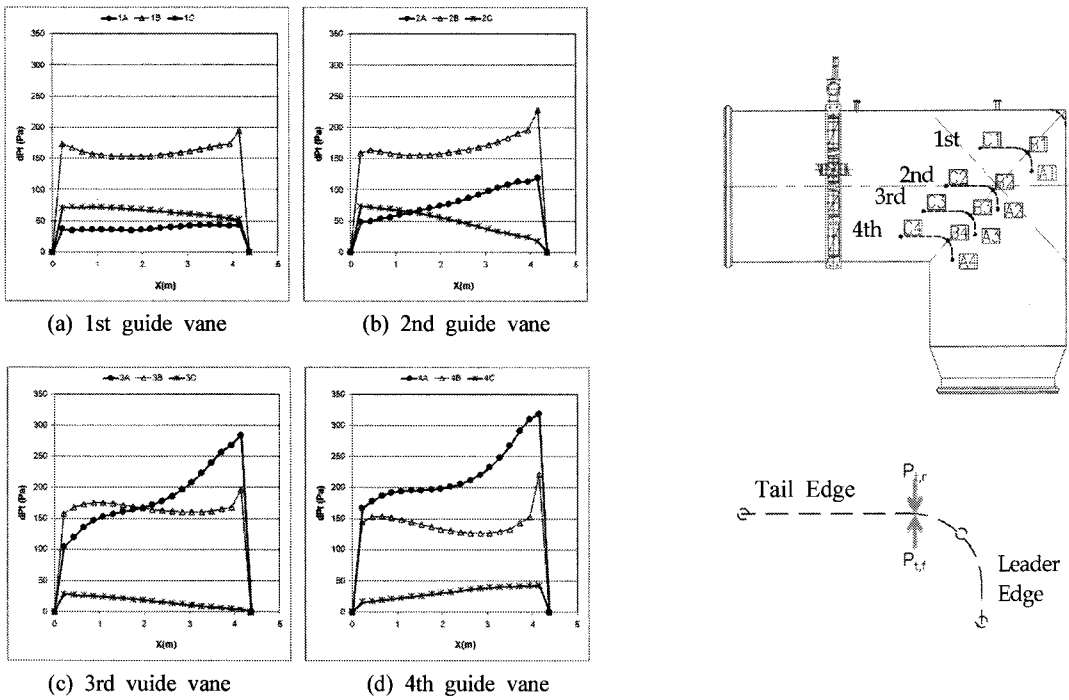


Fig. 9. Pressure drop of exhaust gas in emergency duct.

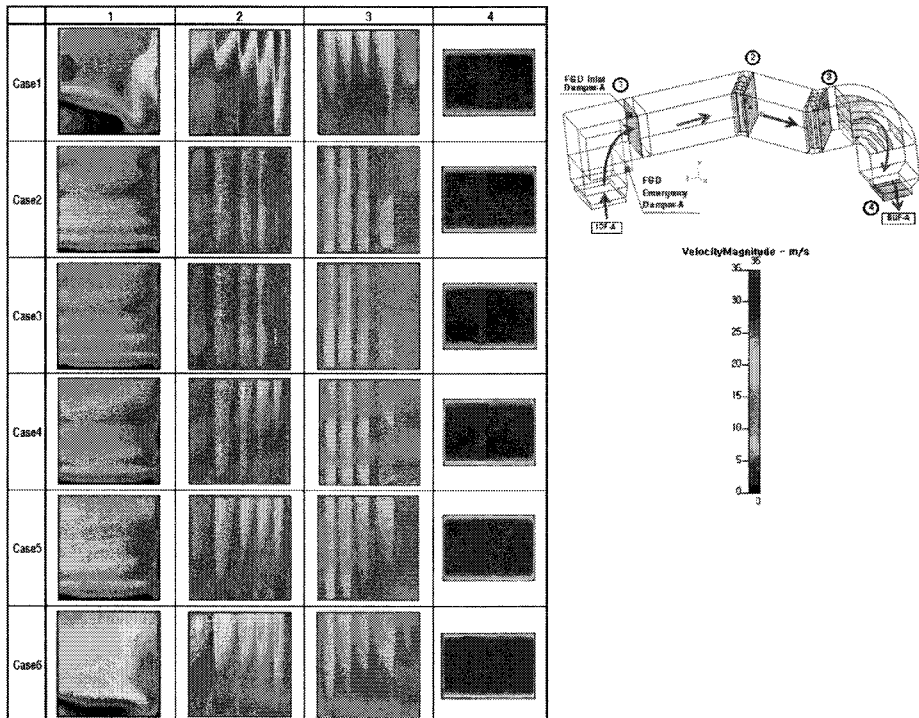


Fig. 10. Distribution of flow velocity of each section in case of the guide vane shape.

와 안내깃의 전후면의 전압차를 4개의 안내깃이 설치된 12지점에서 계산하여 비교하였다. Fig. 9의 X값은 안내깃의 폭을 의미하며 X값이 0이면 Fig. 8의 ① 위치가 되고 X값이 4.370m이면 Fig. 8의 ③ 위치에 해당한다. 유동방향에 직접 부딪히는 안내깃의 면을 전면(front section), 그렇지 않은 면을 후면(rear section)이라 하고 전면에 작용하는 전압 $P_{t,f}$ 에 대한 후면에 작용하는 전압 $P_{t,r}$ 의 차 dP_t 를 식(3)과 같이 계산하여 비교하였다.

$$dP_t = P_{t,f} - P_{t,r} \quad (3)$$

이 dP_t 값이 양의 값을 가지면 전면에 작용하는 전압이 후면에 작용하는 전압보다 크다는 것을 의미한다.

Fig. 9 (a)의 그래프는 오른쪽 그림의 분기관에 설치된 안내깃 중에 최상단 A1, B1, C1의 위치에 모든 안내깃에 걸리는 전압의 차가 안내깃의 길이 방향에 대해서 거의 유사하여 안정함을 알 수 있다. Fig. 9 (a)의 그래프는 오른쪽 그림의 3번째, 4번째 안내깃의 leader edge에 해당하는 A3 및 A4에 걸리는 전압차는 벽면에 고정 가능한 X[0]에서 보다 벽면에 고정이 어려운 X[4.370m]에서 급속히 증가됨을 알 수 있다. 이는 안내깃의 설치가 어려운 지점에서 안내깃의 전후단에 걸리는 전압차가 커져서 파손의 위험이 있다. 또한 Fig. 9 (a)의 모든 안내깃의 tail edge C1, C2, C3, C4에서 안내깃 폭에 따른 전압차는 상대적으로 안내깃의 leader edge보다 작으므로 비상운전 중에 파손의 위험성은 적다.

따라서 정상운전에 사용되는 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트에 안내깃의 leader edge가 요구되는지를 검토하여 유동의 균일도에 영향이 적으면 제거하는 것이 바람직하다.

4.3. 분기관 안내깃의 형상에 따른 유동특성 평가

4.3.1. 유속 분포

4.1과 4.2절의 결과로부터 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트의 분기관에는 반드시 안내깃이 설치되어야 하나 안내깃의 leader edge와 tail edge의 길이를 최적화해야 함을 알 수 있었다. 따라서 Table 5에서 제시된 Case 1~ Case 6의 분기관 안내깃 중에서 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트의 분기관의 최적의 안내깃 형상을 정하기 위하여 전산유체해석을 수행하였다.

Fig. 10는 I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트에서 분기관 안내깃의 형상에 따른 배기가스의 유동특성을 조사할 검토단면에서 유속분포이다. 검토단면 ①은 분기관의 안내깃의 후단인 압력 검출센서가 부착된 FGD 입구덤퍼의 전단이고 검토단면 ② 및 ③은 2단 및 3단 안내깃의 후단이며 검토단면 ④는 B.U.Fan 입구단면이다.

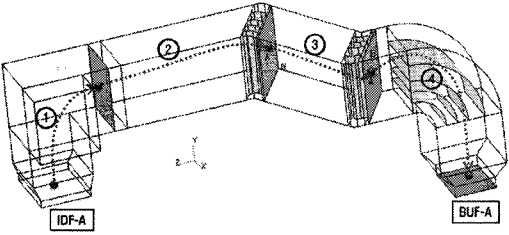
I.D.Fan 출구~B.U.Fan 입구 덕트에서 압력 검출센서 부착된 검토단면 ①과 B.U.Fan의 효율에 직접 관련이 있는 검토단면 ④에서 배기가스는 균일하게 유동되어야 한다. 분기관에서 안내깃을 설치하지 않은 경우인 Case 1의 검토단면 ①에서 최대유속은 25.74 m/s로 압력센서가 부착되는 덕트 상부에서 유속이 빠르고 왼쪽 아래쪽에서 역류가 발생하는 복잡한 유동 현상이 보인다. 그러나 차례로 안내깃을 통과하면서 B.U.Fan 입구에서는 유동이 균일해짐을 알 수 있다.

Case 2는 분기관에 안내깃[A(300)-B(R500)-C(1200)]를 설치하는 경우이고 Case 3은 비상운전을 하는 경우에 안내깃의 파손에 위험이 우려되던 leader edge를 설치하지 않은 경우인 [A(0)-B(R500)-C(1200)]의 비교에서 각 검토단면에 속도분포가 거

Table 5. Characteristics of flow dynamics in the case of the guide vane shape in ① and ④ sections

Section	Unit	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
		[A(0)-B(0)-C(0)]	[A(300)-B(R500)-C(1200)]	[A(0)-B(R500)-C(1200)]	[A(0)-B(R500)-C(600)]	[A(0)-B(R500)-C(300)]	[A(0)-B(R500)-C(0)]
S1	$V_{avg,S1}$	m/s 18.09	16.42	16.42	16.30	16.57	16.95
	σ_{S1}	m/s 7.67	3.35	3.43	3.42	3.78	5.38
	$RMS_{max,S1}$	m/s 17.65	15.71	15.94	15.34	15.75	16.80
S4	$V_{avg,S4}$	m/s 28.60	28.60	28.60	28.59	28.59	28.59
	σ_{S4}	m/s 2.92	2.88	2.87	2.87	2.88	2.91
	$RMS_{max,S4}$	m/s 10.94	10.90	10.89	10.75	10.77	10.81

Table 6. Pressure drop in the case of the guide vane shape in ① and ④ sections



Section	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
	[A(0)-B(0)-C(0)]	[A(300)-B(R500)-C(1200)]	[A(300)-B(R500)-C(1200)]	[A(0)-B(R500)-C(600)]	[A(0)-B(R500)-C(300)]	[A(0)-B(R500)-C(0)]
1	201.7	92.4	108.1	105.8	107.3	123.2
2	39.9	33.8	32.7	34.1	35.0	34.4
3	38.0	38.5	38.4	38.2	37.3	36.6
4	88.4	88.5	88.4	88.5	88.6	87.7
total	368.0	253.2	267.6	266.6	268.3	281.9

의 유사하다. 따라서 leader edge는 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트에서 배기가스의 유동에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단됨으로 leader edge 구간은 설계에서 제외하였다.

Leader edge를 제거한 분기관 안내깃에서 tail edge 길이의 변화가 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트에서 배기가스의 유동에 미치는 영향은 Case 3 ~ Case 6의 검토단면들의 비교를 통해서 판단할 수 있다. Tail edge는 I.D.Fan 출구에서 상승한 배기가스가 B(R500)의 edge에서 -Z방향로 90° 휨 것을 유지시키는 역할을 하기 때문에 tail edge가 짧을수록 덕트의 상부로 치솟는 성질이 유지된다. tail edge의 적정 길이를 결정하기 위하여 분기관의 안내깃 형상에 따라 검토단면 ① 및 ④의 1620 (45×36)개 노드(node)에서 계산된 수치해석 결과 값으로부터 평균 속도 V_{avg} , 속도 표준편차, 속도 RMS의 최대값을 계산하였다. Table 5로부터 tail edge가 1200 mm인 Case 3보다 tail edge가 600 mm일때 검토단면 ① 및 ④에서 속도편차와 속도 RMS의 최대값이 가장 적다. 따라서 tail edge가 600 mm인 경우인 Case 4로 분기관에 안내깃을 설치하는 경우에 배기가스가 I.D.Fan 출구~B.U.Fan입구 덕트 구간을 균일하게 유동한다고 판정할 수 있다.

4.3.2. 압력 손실

분기관에 설치된 안내깃의 형상에 따른 I.D.Fan

출구에서 B.U.Fan 입구 덕트의 각 구간별 압력손실은 Table 6과 같다. 분기관의 안내깃의 형상은 ①구간의 압력손실에 직접 영향이 있지만 ②~④구간은 영향을 크게 주지 않음을 알 수 있다.

Case 1과 Case 2의 비교로부터 분기관에 안내깃을 설치함으로써 압력손실이 115 Pa정도 감소하며 Case 2와 Case 3의 압력손실 비교로부터 leader edge가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 압력손실이 15Pa 정도 감소한다. 또한 분기관에 설치한 안내깃에 leader edge가 없는 경우는 tail edge가 없는 Case 6을 제외하면 Tail edge에 따른 압력손실의 차는 거의 없지만 600 mm인 Case 4의 압력손실이 최소이다.

5. 결론

본 연구는 현재 가동 중인 500MW급 A석탄화력 발전소를 대상으로 정상운전과 비상운전에 공동으로 사용되는 덕트 구간을 포함하는 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트 구간과 비상덕트 구간에서 배기가스의 유동특성을 CFD-ACE+2008를 사용하여 전산유체해석을 수행하였다.

배연탈황설비가 정상 운전되어 배기가스가 B.U.Fan을 거치게 되는 경우에 주요 검토단면에서 배기가스의 속도 표준편차와 속도 RMS의 최대값이 적을수록 배기가스가 균일하게 유동할 수 있도록 분기관의 안내깃이 설계된 것으로 평가하였다. 또한 배

연탈황설비가 비상 운전되어 배기가스가 bypass되는 경우에 분기관에 설치된 안내깃의 전후면에 걸리는 전압차가 안내깃을 고정시키는 두 점사이의 거리 따라 변화가 적으면 안전한 것으로 평가하였다.

이로부터 비상운전 중 분기관에 안내깃의 안전성을 높이면서도 정상 운전 중에는 덕트 내 주요 검토 단면에서 유동의 균일도를 높이고 압력손실을 줄일 수 있는 안내깃의 형상을 찾을 수 있었다. 현재 가동 중인 500 MW급 A석탄화력발전소에서 정격(Nominal Rating, NR) 보일러 운전부하 조건에서 배연탈황 설비를 운전하는 경우에는 I.D.Fan 출구에서 B.U.Fan 입구 덕트와 비상덕트의 분기관에서 안내깃은 leader edge가 없으면서 tail edge가 600 mm로 설계된 안내깃[A(0)-B(R500)-C(600)]이 적절한 것으로 도출되었다.

감사의 글

2008년 지식경제부 플랜트엔지니어링기술인력 양성사업에서 지원된 재원으로 본 연구의 일부가 수행되었습니다.

참고 문헌

1) Aurora G., Jose A. M., Angel I., 2005, Mechanical

and non-linear modeling approaches to in duct desulfurization, Chemical Engineering and Processing, 709-715.

- 2) 안희수, 박승수, 김기형, 김형호, 2007, 모사 탈황흡수탑을 이용한 Spray Type 탈황설비 최적운전 방안에 관한 연구, 공업화학, 18(1), 29-35.
- 3) 배진호, 김광추, 박만홍, 박경석, 이종원, 2000, 배연탈황설비 덕트쿨러에서의 유동균일화에 관한 연구, 공기조화·냉동공학, 12(2), 120-130.
- 4) 정진도, 김장우, 김병환, 박영문, 2007, 배연탈황 공정 중 DSI 공법의 탈황효율 향상을 위한 전산유체역학전연구(I), 대한환경공학회, 29(1), 47-53.
- 5) 최정렬, 이경옥, 박수미, 2003, 삼천포 화력 1-4호기 탈황설비의 유동 최적화를 위한 열유동해석, 최종보고서, 한국코트렐(주)·삼환기업(주).
- 6) 이경옥, 2006, 하동화력발전소 7,8호기 배연탈황설비의 효율향상을 위한 전산유체역학 해석설계, 최종보고서, 한국코트렐(주)·(주)대우건설.
- 7) 이경옥, 2007, 장항 탈황설비 흡수탑의 유동 균일화를 위한 전산유체역학해석, 최종보고서, 한솔EME.
- 8) Sugiyama S., Yamamoto M., Nishikawa H., Oda Y., 1991, Numerical investigations on fully-developed and unsteady flows in a curved duct, JSME, Part B, 57, 18-24.
- 9) Launder B. E., Spalding D. B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2), 269-289.