

배연탈황설비 덕트쿨러에서의 유동균일화에 관한 연구

배진호*, 김광추*, 박만흥*
박경석**, 이종원**

A study on a uniformity of flow field in a duct cooler of FGD system

J. H. Bae, K. C. Kim, M. H. Park
K. S. Park, J. W. Lee

(Received June 2, 1999; revision received October 9, 1999)

ABSTRACT

A flow uniformity in a duct cooler of duct system of FGD(Flue Gas Desulfurization) linking a reheater and a absorber has been investigated in the present study. For this purpose, the flow characteristics according to the geometry of a vertical and horizontal vane in a curved duct of the duct system has been examined with the aid of a numerical simulation. The results indicate that the vertical vane with a little deflection toward a recirculation region makes the flow distribution in the duct cooler more uniform than that without deflection, and horizontal vane does not effect the change of the flow distribution for an angle of inclination. The mean flow uniform factor shows its maximum for duct system without the vane(case NP) and its minimum for the vertical vane with a little deflection(case P-0.8-0).

Key words: Fuel gas desulfurization system(배연탈황설비), Vane(베인), Flow uniform factor(유동균일화 계수), Duct cooler(덕트쿨러)

기호 설명

A : 유동 단면적 [m^2]
 a, b, c, d, e, f : 수직베인의 간격 [m]
 D_h : 수력직경 [m]
 F : 덕트쿨러 전단의 횡단면
 k : 난류운동에너지

L : 덕트쿨러 후단의 횡단면
 p : 압력 [N/m^2]
 Q : 유량 [m^3/s]
Re : Reynolds수
 w : 속도성분 [m/s]

그리스 문자

α : 수평베인의 각도 [°]
 ϵ : 난류운동에너지 소산율
 μ : 점성계수 [$kg/(m \cdot s)$]

* 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소
(E-mail address: kkc@ns.kopec.co.kr)
** 경희대학교 공과대학 기계공학과

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ_s : 유동 균일화 계수
 σ_m : 평균 유동 균일화 계수

상첨자

— : 평균

하첨자

in : 덕트 입구
 n : 수직 성분

1. 서론

최근 환경문제가 각종 국제기관에서 있어서 주요 문제로 등장하기 시작하고 있으며, 국내에서도 아황산 가스에 대한 대기환경기준이 1995년부터 연간 평균 0.023 ppm에서 2005년 0.008 ppm으로 세계보건기구(WTO)의 권고수준을 따르게 될 전망이다. 이에 대비해 정부에서는 도시지역 및 오염이 심한 공단지역을 중심으로 사용연료의 전환을 권고함과 동시에 대기오염 배출원의 배출허용기준을 1999년까지 3단계로 대폭 강화하기에 이르렀다.⁽¹⁾ 따라서 비교적 큰 오염물질 배출원인 화석연료를 사용하는 발전소 및 산업시설에서는 배연탈황(FGD, Flue Gas Desulfurization)설비와 같은 본격적인 배출가스 방지시설에 대한 수요가 증대되고 있는 실정이다. 배연탈황기술은 화석 연료중에 포함되어 있는 유황(sulfur)분이 연소 되어 발생한 배기가스 중의 황산화물을 흡수, 산화, 중화 혹은 흡착 등의 화학적 및 물리적인 방법으로 제거하고, 처리된 가스를 연돌(chimney)을 통하여 배출하는 공정이다. 배연 탈황설비의 설치 실적이 많은 일본 및 구미 선진국에서 배연탈황설비로서 황산화물 제거효율이 높으며(90%-97%), 신뢰성이 우수하고, 운전비가 저렴하며, 운전실적이 많은 습식 석회석 석고법(wet limestone-gypsum process)을 주로 사용하고 있다.⁽²⁾ 배연탈황설비는 크게 배기가스계통, 석회석 취급계통, 유황성분과 흡수제가 반응하는 흡수탑(absorber)계통 및 석고 취급계통으로 나뉜다. Fig. 1은 습식석회석 석고법 배연탈황설비의 개략도로서 배기가스 계통은 송풍기(fan), 덕트 쿨러(duct cooler) 그

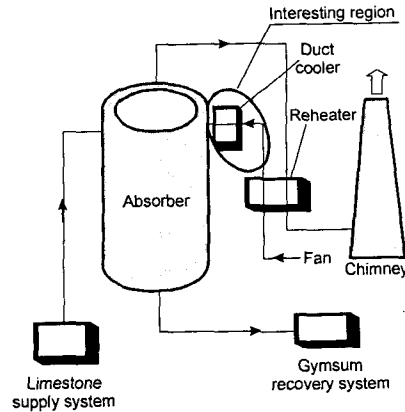


Fig. 1 Schematic diagram of FGD system for wet limestone-gypsum process.

리고 재열기(reheater)로 구성된다. 배기가스는 보일러, 재열기, 덕트쿨러, 흡수탑 및 재열기를 거쳐 최종적으로 연돌을 통해 대기 중으로 방출된다. 여기서 덕트쿨러는 재열기에서 1차로 냉각된 배기가스에 슬러리를 분사하여 흡수탑으로 유입되는 배기가스의 온도를 포화온도까지 냉각시키며, 흡수탑의 재질을 보호하고, 흡수탑 덕트관 하부에 스케일(scale)이 생성되는 것을 방지하기 위하여 흡수탑의 전단에 설치한다. 이때 덕트쿨러 내에서 배기가스의 흐름이 균일하지 못할 경우, 배기가스와 분사된 슬러리와와의 접촉이 불균일하여 불포화 배기가스가 흡수탑으로 유입될 수 있다. 이 경우에는 흡수탑의 재질이 손상되거나, 흡수탑 덕트 하부에 스케일이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 제거하기 위해서는 설계 단계에서부터 배기 가스가 지나는 덕트의 형상을 유동의 흐름이 원활하도록 설치하여야 하나 실제적으로 설치공간의 어려움으로 인하여 이를 반영하기는 쉽지 않다. 따라서 덕트내부의 유동이 균일하게 흐를 수 있도록 덕트내에 베인(vane)등을 설치하는 방안이 제시되고 있다. 그러나 지금까지 설치시의 편의만을 위하여 등간격으로 설치하고 있어 본 연구의 모델과 같이 덕트의 형상이 복잡할 경우에는 유동의 흐름을 원활하도록 하는 것이 어려우며, 오히려 잘못 설치된 베인으로 인해 유동의 흐름을 방해할 수도 있다. 따라서 이러한 배연탈황설비 덕트내 황산화물의 원활한 제거를 위한 유동균일화에 대한 연구가 선행되어

야 하나 기존의 덕트내부의 유동특성에 대한 연구등(7-11)에서는 이러한 연구가 거의 이루어지지 않았으며 본 연구와 같이 여러 형태의 덕트가 조합된 경우에 배인의 위치 변화에 따른 유동특성에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 복잡한 형태의 덕트계통에 대한 정확한 유동장 해석과 함께 유동을 균일화를 위한 정량적인 지표의 산출과 적용 방법이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 유동균일화 변수를 도입하여 Fig. 1에 도시한 배연탈황설비에서 타원형으로 표시한 재열기 출구와 흡수탑을 연결하는 덕트계통에 설치된 덕트쿨러내의 유동 균일화에 관하여 고찰하기 위하여, S화력의 탈황설비중 재열기 출구에서 흡수탑까지 이르는 덕트계통을 연구모델로 선정하였다. 유동해석은 배인이 설치되지 않은 경우에 대하여 우선적으로 실시하였다. 이를 토대로 덕트쿨러 전단에 여러 가지 형태의 배인을 설치하여, 덕트쿨러내의 유동을 균일화 시킬 수 있는 최적의 배인의 기하학적 형상을 구하고자 하였다.

2. 모델선정

본 연구에서 선정한 S화력의 배연탈황설비 중, 재열기 출구와 흡수탑을 연결하는 덕트계통의 기하학적 형상을 Fig. 2(a)~(d)에 도시하였다. 그림에서 보듯이 절대 좌표계의 원점은 덕트의 유입구에 설정하였으며, ξ , η 및 ζ 좌표는 경계밀착좌표계로서 각각 주유동에 수직한 제 1방향, 제 2방향 그리고 주유동 방향으로 설정하였다. Fig. 2(a)에서 재열기출구를 떠난 배기가스는 안내 배인(guide vane), 안내덕트(guide duct), 50° 곡관 덕트(curved duct) 그리고 덕트쿨러를 거쳐 흡수탑으로 유입된다. 곡관 영역에서는 유체의 원심력, 관성력 및 곡관 벽면에서의 점성력의 상호작용에 의하여 곡관 하류에 재순환 영역 및 2차유동이 발생된다.⁽²⁻⁴⁾ 이러한 재순환 영역과 2차유동은 덕트쿨러 내에서의 유동을 불균일하게 만들고, 결과적으로 흡수탑으로 유입되는 유동을 불균일하게 하여 흡수탑의 성능을 저하시키는 원인이 된다.

본 연구에서 고려하고 있는 덕트형상은 완전한 3차원 형태이므로 형상에 대한 이해를 돕기 위하

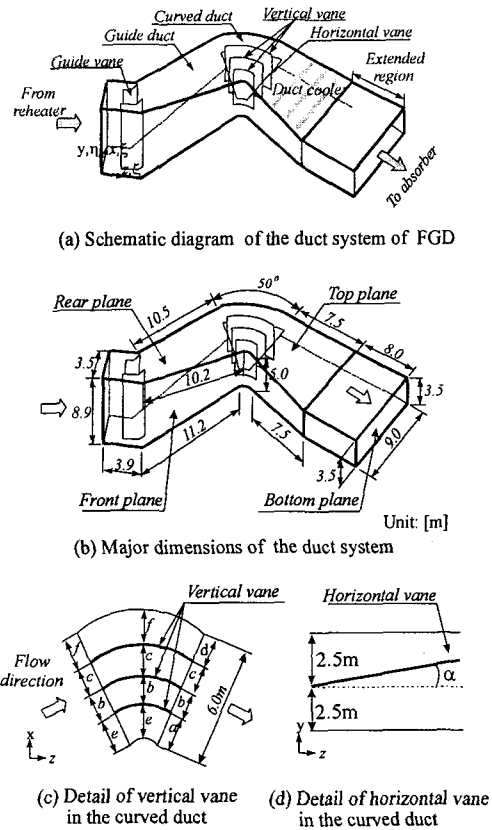


Fig. 2 Geometry of duct system linking a reheater and an absorber.

여 Fig. 2(b)를 추가로 도시하였다. 덕트 유입구 단면과 덕트유출구 단면은 각각 3.5 m × 8.9 m 및 9.0 m × 3.5 m의 크기의 직사각형 구조이다. 또한 덕트쿨러 전단에 설치된 곡관의 단면은 ξ 및 η 방향으로 6 m × 5 m의 사각단면을 갖는다. 이후 논의의 편의를 위해서 그림에 나타난 덕트쿨러의 외곽면을 ξ 방향 전단면(front plane), ξ 방향 후단면(rear plane), η 방향 하부면(bottom plane) 및 η 방향 상부면(top plane)으로 지칭한다. 본 연구모델의 곡관 덕트에는 덕트내의 유동을 균일하게 유지시키기 위하여 3개의 수직배인(vertical vane)과 1개의 수평배인(horizontal vane)이 설치되어 있다. Fig. 2(c)에는 곡관덕트에 설치되는 수직배인의 형상을 개략적으로 보여준다. 본 연구에서는 Fig. 2(c)에 나타난 수직배인의 왼쪽면과 중앙면에서의 수직배인간격 b, c.

Table 1 Run numbers and parameters

Case	Vertical vane a:b:c:d:e:f	Horizontal vane, α
NP	No Plate	No Plate
P-1-0	1: 1: 1: 1: 1: 1	0°
P-0.9-0	0.9: 1: 1: 1.1: 1: 1	0°
P-0.9-5	0.9: 1: 1: 1.1: 1: 1	5°
P-0.8-0	0.8: 1: 1: 1.2: 1: 1	0°
P-0.8-5	0.8: 1: 1: 1.2: 1: 1	5°

e 및 f의 길이는 동일하게 고정하고, 오른쪽면의 a와 d의 길이를 기준형상 (a:d=1:1)으로부터 2가지 형태로 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 이때 수직베인의 2가지 형상에 대하여 수평베인 경사각 α 도 아울러 계산조건으로서 고려하였다. 수평베인 경사각 α 는 곡관덕트에 설치되는 수평베인의 형상을 나타낸 Fig. 2(d)에서 볼수 있듯이 z축과 수평베인이 이루는 각도로 정의되었다.

본 연구에서는 계산결과와의 비교를 위하여 베인이 설치되지 않은 덕트계통을 추가적으로 계산조건으로서 고려하였으며, 이와 같이 선정된 모두 6가지 경우의 계산조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 예를 들어 case NP는 베인이 설치되지 않은 덕트계통을 의미하며, case P-1-0은 수직베인이 등간격으로 설치되고, 수평베인의 경사각, α 가 0° 인 덕트계통을 의미한다.

3. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 선정한 배연 탈황설비의 덕트계통에서 공급유량은 실제의 S화력 발전소에서 최대 공급 유량인 1.2×10^6 CMH로 설정하였으며, 이에 따른 덕트 입구에서의 유입공기속도는 9.5 m/s이다. 덕트입구에서의 Reynolds수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Re = \frac{\rho w_{in} D_h}{\mu} \quad (1)$$

여기서 w_{in} 은 주유동의 평균속도이며, D_h 는 덕트 입구단면의 수력직경이다.

본 연구모델에서 식(1) 정의에 의한 Reynolds

수는 3.09×10^6 이므로 덕트내 유동특성은 3차원, 정상상태, 비압축성 및 난류유동으로 간주할 수 있다. 난류모델로서는 재순환 유동 및 급격한 유동단면적의 변화가 일어나는 난류유동특성을 비교적 타당하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 RNG (ReNormalized Group) $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 덕트내부의 유동특성에만 관심을 가지므로 덕트벽면에서 대기로의 열전달 효과는 무시하였다. 따라서 덕트계통내 유동장을 기술하는 지배방정식은 아래와 같이 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식 및 난류운동에너지 소산을 방정식으로 나타낼 수 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

난류운동에너지 방정식

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

난류운동에너지 소산을 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

윗식에서 ρ , u_j , μ , k , ϵ 및 p 는 각각 밀도, 속도 성분, 점성계수, 난류운동에너지, 난류운동 에너지 소산을 및 압력을 나타낸다. 또한 응력텐서, τ_{ij} , 난류 동점성계수, μ_t , 난류 생성항, G 및 난류상수, C_1 , C_2 , σ_k , σ_ϵ , η , η_0 및 β 는 아래와 같다.

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = 2\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \eta = S \frac{\epsilon}{k}$$

$$C_1 = 1.42, C_2 = 1.68, C_\mu = 0.085, \beta = 0.012 \\ \sigma_k = 0.719, \sigma_\varepsilon = 0.719, \eta_o = 4.38 \quad (6)$$

윗식에서 S_{ij} 및 S 는 다음과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (7)$$

속도경계조건으로는 덕트 유입구에서 입구단면에 수직하게 9.5m/s의 주유동방향 속도가 유입되는 것으로 간주하였으며, 모든 덕트벽면 및 베인벽면에 대해서는 점착조건을 적용하였다. 또한 유출구에서의 경계조건으로는 균일압력조건을 사용하였다. 난류방정식의 경계조건으로서 유입구에서 난류 운동에너지, k_{in} 과 난류운동에너지 소산율, ε_{in} 은 주유동방향 속도, w_{in} 의 함수로서 각각 아래식과 같이 부여하였다. 이때 난류강도는 주유동 속도의 1%로 간주하였다.

$$k_{in} = (0.01 \times w_{in})^2 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{in} = (0.1643 \times k_{in}^{1.5}) / (0.1 \times D_h) \quad (9)$$

4. 수치해석방법

본 연구에서는 배연탈황설비의 덕트계통에서 유동특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 사용하였다. 수치계산시 공간도식으로는 하이브리드도식⁽⁵⁾을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLEST⁽⁶⁾방법을 사용하였다. 좌표계와 속도성분으로는 경계밀착좌표계(body fitted coordinate system)와 공변속도성분(covariant component)를 각각 사용하였다. 계산에 사용된 격자수는 ξ , η 및 ζ 방향으로 각각 $28 \times 26 \times 80$ 개이며, Fig. 3에 격자를 도시하였다.

본 수치계산에서는 종속변수의 수렴조건으로서 이산화 방정식의 잔차가 10^{-5} 이하에 도달하면 수렴한 것으로 간주하였으며, 속도장 및 난류량의 수렴조건을 만족하기 위하여 각각 약 1000회의 반복계산이 필요하였다. 계산시간은 IBM Pentium II 266 MHz에서 약 2시간이 소요되었다. 베인이 설치되지 않는 경우에는 재순환 영역이 크게 발생하여 해가 수렴하기까지 더욱 많은 반복계산이 필요하였으며, 약 2000회의 반복계산이 필요하였다.

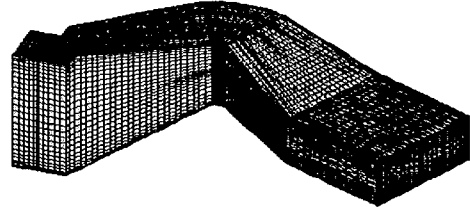


Fig. 3 Grid layout for duct system.

반복계산시 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완을 도입하였다. 압력과 난류량에 대해서는 선형이완(linear relaxation)방법을 적용하여 이완계수로서 각각 0.4와 0.3을 사용하였다. 단, 속도성분들에 대해서는 오류시간간격이완(false time step relaxation)방법을 적용하여 오류시간간격은 0.3을 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

배연탈황설비의 덕트계통에 대한 본 계산에 앞서 프로그램의 검증 및 수치해의 타당성을 조사하기 위해 Fig. 4의 상단에 도시된 경사각, $2\theta = 4^\circ$ 인 사각 덕트에 대한 수치계산을 실시하고 이를 실험결과⁽⁷⁾와 비교하였다. 덕트의 입출구의 형태는 길이비, $d/b=1$ 인 정사각형 단면으로써 상온의 공기가 균일속도로 입구를 통해 유입되며 $Re=1.38 \times 10^5$ 이다. Fig. 4는 이러한 조건에서의 입구에서 출구까지 위치에 따른 중심단면에서의 속도분포를 비교한 것으로 본 수치계산 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

예비계산을 바탕으로 본 논문에서 채택한 곡관덕트에 대한 수치해석을 수행하였으며, 곡관덕트 구간에 베인이 설치되지 않은 case NP의 경우에 대한 3차원 속도벡터분포를 Fig. 5에 도시하였다. 벡터분포를 도시한 단면은 ξ 방향 전단면, η 방향 상부면 및 덕트 유출구에 인접한 공기층의 세가지 단면이다. 그림의 좌측에 위치한 유입구에서 유입된 공기는 ξ 방향 전단면의 곡관덕트 출구 근처에서 커다란 재순환 영역을 형성하는 것을 알 수 있다. 이러한 재순환 영역의 생성과정은 관성력, 벽면에서의 점성력 및 원심력의 상호작용에 의하여 발생한다.^(3,4)

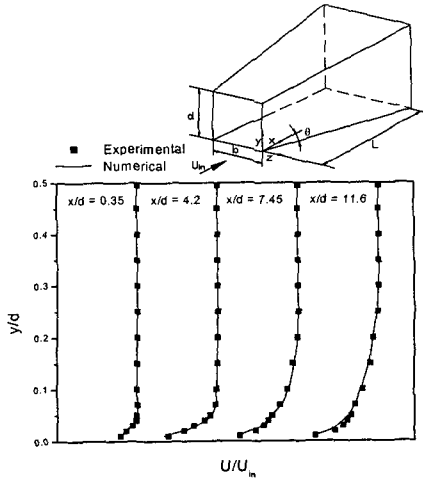


Fig. 4 Comparison between numerical result and experimental result for velocity profiles of a 4 degree diffuser.

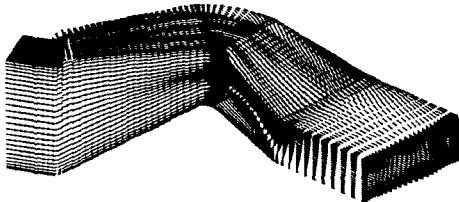


Fig. 5 3-dimensional velocity vector for NP.

Fig. 6에는 6가지 배인 형상에 대하여 η 가 일정한 단면에서의 속도벡터 분포를 도시하였다. case NP와 case P-1-0의 η 방향 하부면에서는 곡관덕트의 안쪽 영역에서는 곡관에서 발생하는 박리가 곡관덕트 안쪽의 하류지역에 커다란 재순환영역이 발생되는 것을 볼 수 있다. case NP와 case P-1-0의 η 방향 상부면에서는 이러한 재순환 영역이 관찰되지 않으며, 이것은 곡관의 유출구쪽에서 덕트의 형상이 음의 η 방향으로 약간 편향되어 있기 때문이다. 수직배인이 곡관의 안쪽영역으로 편향된 case P-0.9-0, case P-0.9-5, case P-0.8-0 및 case P-0.8-5의 경우에 η 방향 상하부면에서 유사한 속도벡터 분포를 보여주고 있으며, 재순환 영역은 나타나지 않는다.

본 연구의 Fig. 6에 나타낸 속도벡터를 보다 자세히 고찰하기 위해, η 방향 하부면과 η 방향 상부면에 인접한 유동영역에서 격자선을 따르는 공변속도의 등속도장을 Fig. 7(a)~(f)에 도시하였다. 배인이 설치되지 않은 case NP에 대한 η 방향 상부면의 등속도장인 Fig. 7(a)를 살펴보면, 곡관 내측이 곡관 외측에 비하여 공변속도가 크게 나타나며 이것은 곡관에서의 난류유동특성에 대한 결과와 정성적으로 일치한다. 또한 덕트클러의 η 방향 하부면에서는 안내덕트와 곡관에서 발달한 주유동의 관성력과 원심력의 상호작용이 양의 ξ 방향으로 유동을 편향시키므로, 재순환 영역이 발생하지만 η 방향 상부면에서는 이러한 재순환 영역이 발생하지 않는다. Fig. 7(b)는 수직배인은 등간격으로 설치되고, 수평배인은 0° 의 경사각을 갖는 case P-1-0에서의 등속도장을 보여준다. 배인이 설치되지 않은 Fig. 7(a)의 등속도장과 비교하면 덕트클러의 η 방향 하부면에서 재순환 영역의 크기가 약간 감소된 것을 살펴볼 수 있다. 곡관에 배인이 설치되었음에도 불구하고 재순환 영역의 크기가 크게 감소하지 않는 것은 곡관의 원주각이 50° 로서 작기 때문이며, 이로부터 곡관의 형상을 따르는 수직배인은 주유동 양상을 크게 변화시킬 수 없음을 알 수 있다.

수직배인 출구면이 재순환 유동영역으로 약간 편향되어 있는 Fig. 7(c)의 case P-0.9-0의 경우에 속도분포가 η 방향 하부면에서 재순환 영역이 완전히 사라지고 7.4 m/sec의 주유동속도를 나타내는 것을 알 수 있다. 수직배인의 간격은 Fig. 7(c)와 동일하게 가정하고 수평배인의 경사각을 5° 기울여 설치한 Fig. 7(d)의 case P-0.9-5의 경우에는 η 방향 상부면에서 case P-0.9-0와 유사한 등속도장을 보이지만, η 방향 하부면에서는 ξ 방향 후단면 근처의 덕트클러영역에서의 속도는 줄어든 것을 알 수 있다. 수직배인을 재순환 영역으로 더욱 편향시킨 Fig. 7(e)~(f)의 case P-0.8-0과 case P-0.8-5의 경우에는 case P-0.9-0과 case P-0.9-5의 경우와 정성적으로 유사한 등속도장을 보여주며, 재순환 영역이 크게 개선된 것을 알 수 있다. 따라서 덕트클러에서 발생하는 재순환 영역의 크기를 감소시키기 위해서는 수직배인의 출구면을 재순환 영역으로 편향하여 재순환 영역에서의 주유동속도를 증가시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

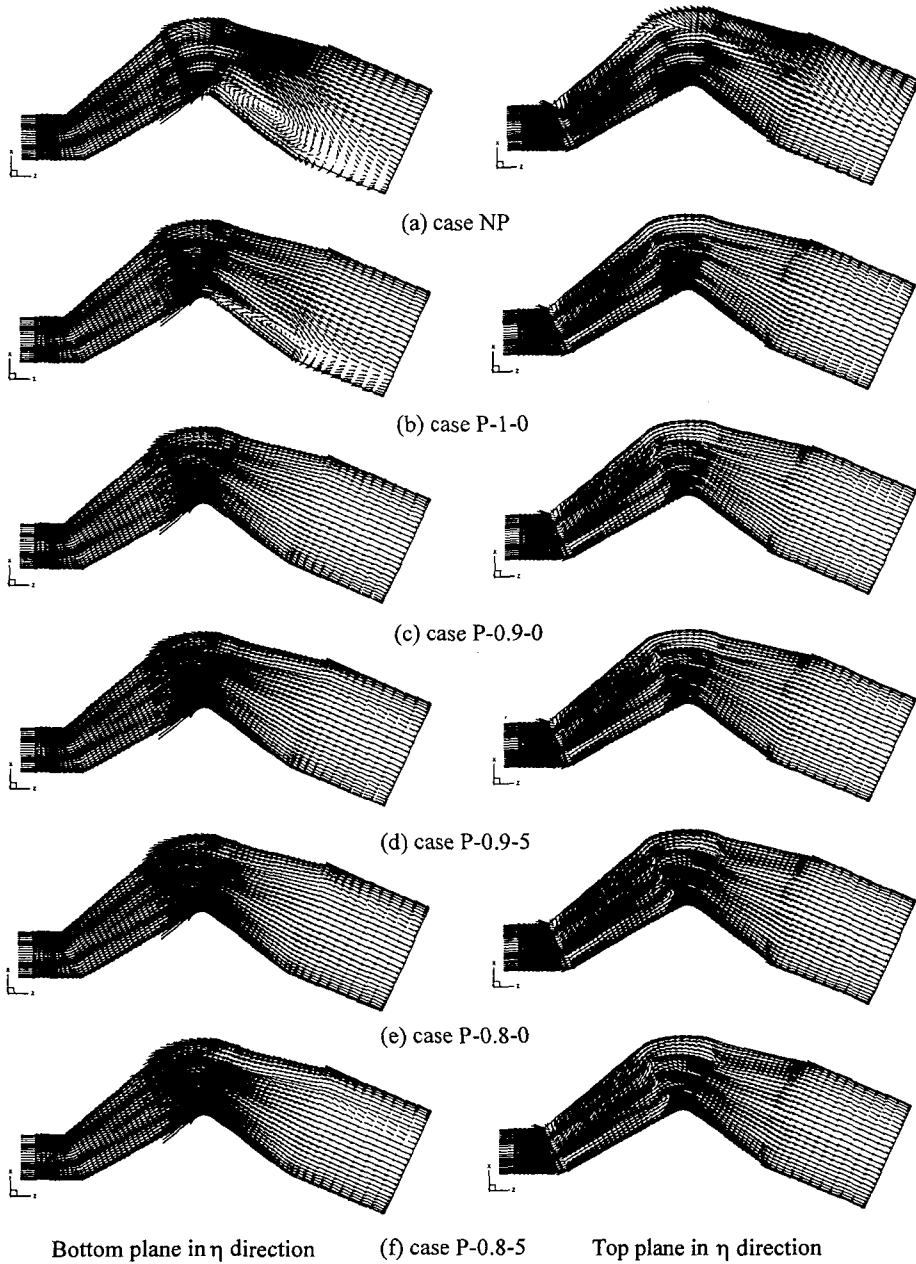


Fig. 6 Velocity vector at the bottom plane and top plane in η -direction.

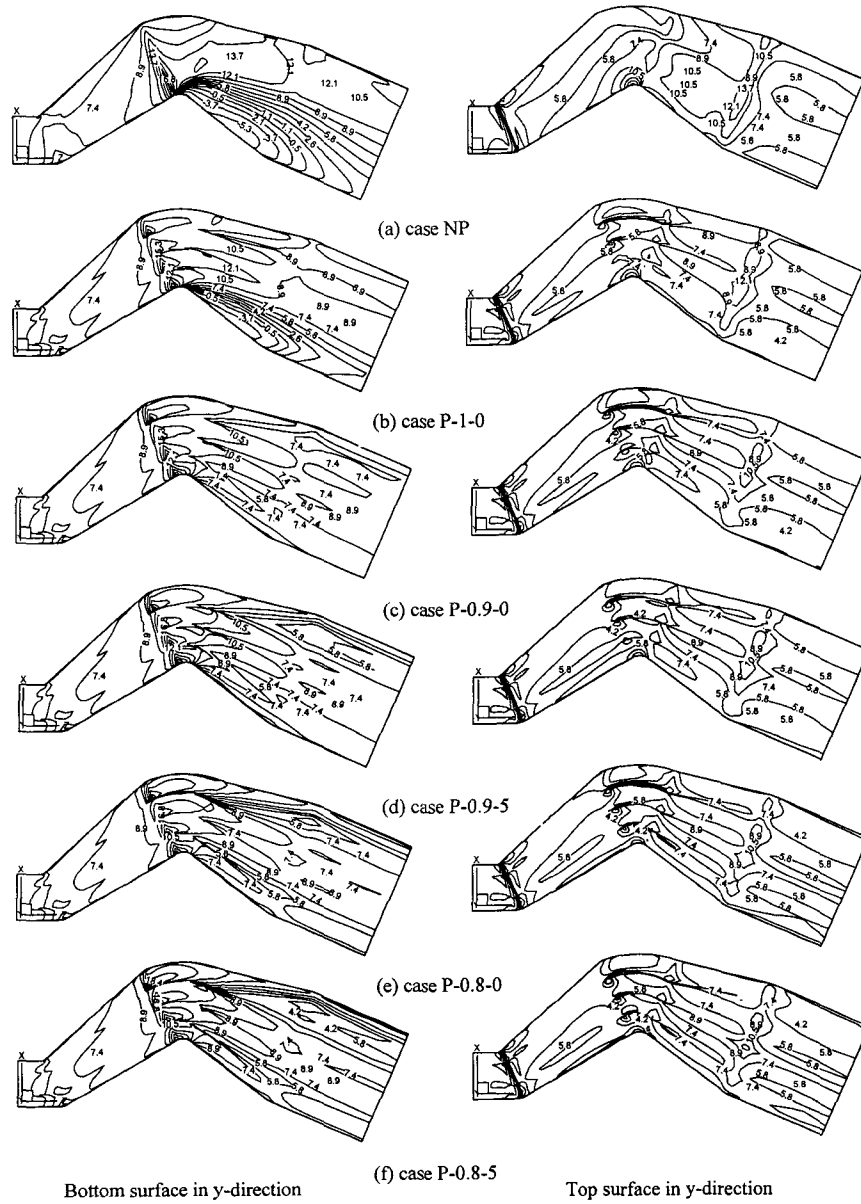


Fig. 7 Contours of the main flow velocity at the bottom plane and top plane in η -direction (unit ; m/s).

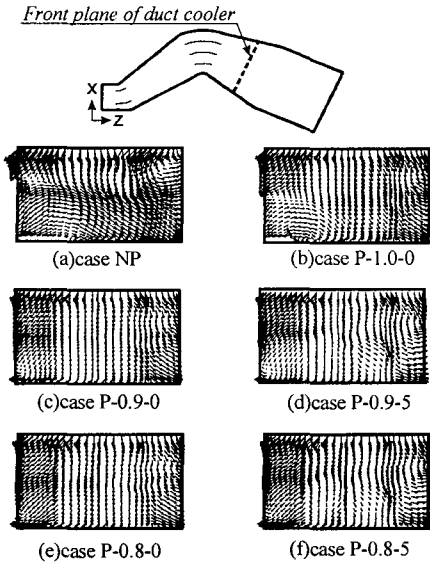


Fig. 8 Velocity vectors at the front plane of duct cooler.

덕트쿨러에서 주유동에 수직한 단면에 발생하는 2차유동 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 8(a)~(f)에서는 그림의 상단에 도시한 덕트계통에서 점선으로 표시한 곡판 덕트 출구에 인접한 $\xi-\eta$ 단면에서의 속도분포를 도시하였다. Fig. 8(a)의 베인이 설치되지 않은 case NP의 경우에는 왼쪽 하단부와 오른쪽 상단부에서 각각 2차 유동세포가 관찰된다. 또한 수평베인이 경사각을 갖는 경우인 case P-0.9-5 및 case P-0.8-5에 있어서는 경사각을 갖지 않는 경우인 case P-0.8-0 및 case P-0.9-0에 비하여 비교적 복잡한 속도분포를 보여준다. Fig. 8(b), (c) 및 (e)의 case P-1-0, case P-0.9-0 및 case P-0.8-0에서 수직베인 출구면이 편향된 경우에는 이러한 2차 유동이 사라지며 유동에 수직한 단면에서의 속도분포가 보다 균일해지는 것을 알 수 있다.

덕트쿨러에서의 유동특성을 정량적으로 고찰하기 위하여 다음에 정의한 유동 균일화 계수(flow uniform factor), σ_s 를 도입하여 여러가지 베인 형상에 따른 덕트쿨러 내부에서의 유동특성을 비교하였다. 유동 균일화 계수는 동일한 단면에서 평균속도에 대한 각 속도성분의 표준편차를 의미하므로 이 값이 클수록 속도성분의 불균일도가 높아지는 것을 의미한다.

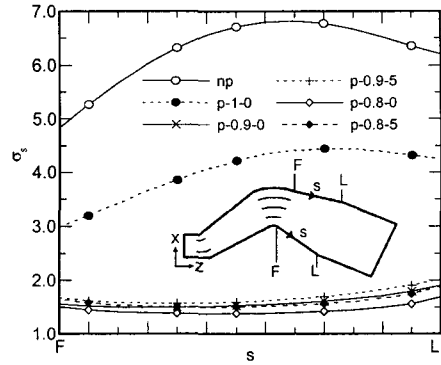


Fig. 9 Distribution of the flow uniform factor at cross section along s line between F and L.

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\int_A (w_n - \bar{w})^2 dA}{\int_A dA}} \Bigg|_{\text{at } s \text{ cross section}} \quad (10)$$

$$\bar{w} = Q/A \quad (11)$$

여기서 A , Q , w_n 및 \bar{w} 는 각각 덕트표면을 따르는 횡단면에서의 덕트 단면적, 유입공기유량, 단면에 수직한 속도성분 그리고 단면에서의 평균 속도이다.

Fig. 9에는 베인이 설치되지 않은 경우와 베인이 설치된 5가지 경우에 대하여 유동균일화계수를 덕트표면을 따르는 좌표 s(Fig. 9 참조)에 따라 나타내었다. 유동균일화계수는 수직베인이 설치되지 않은 경우가 수직베인이 설치된 경우에 비하여 전체적으로 큰 값을 보이며, 덕트쿨러 중간지점에서 최고값을 보이다가 이후에는 유동이 혼합되어 덕트 출구쪽으로 갈수록 감소되는 것을 알 수 있다.

수직베인이 등간격으로 설치된 case P-1-0의 경우에는 베인이 설치되지 않은 case NP에 비해 σ_s 가 전체적으로 40% 정도 감소하지만, 베인이 부착되지 않은 case NP의 경우와 유사하게 s선을 따라 σ_s 가 2차 포물선 형태의 분포를 보여주고 있다. 이것은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 case P-1-0에서 재순환 영역의 크기가 여전히 크게

나타나므로, 물리적으로 자연스럽게 유추할 수 있는 결과이다.

case P-0.9-0, case P-0.9-5, case P-0.8-0 및 case P-0.8-5에 대한 결과로부터, 수직배인의 출구면을 재순환영역으로 약간만 편향시켜도 덕트클러에서 상당히 균일한 속도분포를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 본 연구의 계산 결과에서 s 선을 따라 횡단면에서의 유동이 가장 균일하게 나타나는 경우는 덕트 출구면에서 수직배인이 가장 많이 편향되고, 수평배인이 경사각을 갖지 않는 case P-0.8-0인 경우이다.

덕트클러의 전영역에 걸쳐 유동균일화 정도를 고찰하기 위하여 전술한 σ_s 를 덕트클러 전 영역에 걸쳐 평균한 유동 균일화 계수(mean flow uniform factor), σ_m 을 식(12)와 같이 정의하였다.

$$\sigma_m = \int \sigma_s ds / \int ds \quad (12)$$

식(12)에 정의된 평균 유동 균일화 계수는 그 값이 작을 수록 덕트 내의 유동이 균일화되어 흐르는 것을 나타낸다.

Fig. 10에는 식(12)에 정의된 평균 유동균일화 계수를 모든 계산조건에 대하여 도시하였다. 그림을 살펴보면 case P-0.8-0에서는 σ_m 이 1.407로서 가장 작은 값을 나타냈으며, 배인이 설치되지 않은 case NP의 경우는 σ_m 이 case P-0.8-0의 경우보다 약 4.5배 정도로 증가되었다. 또한

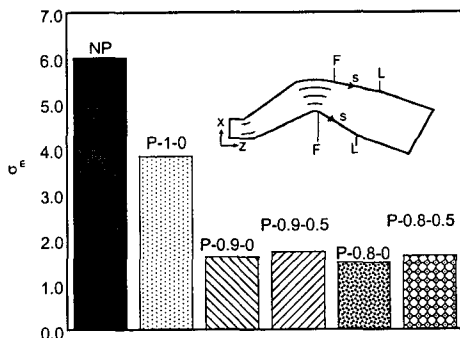


Fig. 10 Mean flow uniform factor at cross section along s line between F and L.

수직배인이 등간격으로 설치된 P-1-0인 경우는 σ_m 이 약 2.8배 정도 크게 나타났다. 그러나 수평배인이 5°의 경사각을 갖는 경우에는 경사각을 갖지 않는 경우에 비하여 약간씩 큰 값을 나타냈으며, 이로부터 수평배인은 경사각을 갖지 않는 것이 덕트클러의 유동 균일화에 있어서 바람직하다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 실제의 배연탈황설비에서 재열기 출구와 흡수탑을 연결하는 덕트계통에서 덕트클러내의 유동균일화에 관하여 고찰하였다. 이를 위하여 덕트계통의 곡관에 설치된 배인의 기하학적 형상에 따른 유동특성을 수치적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 덕트클러내에 발생하는 재순환 영역을 감소시키기 위해서는 수직배인의 출구면을 재순환 영역으로 편향시켜 재순환 영역에서의 주유동 속도를 증대시키는 것이 바람직하다.
- (2) 평균 유동 균일화 계수는 유동 균일화가 가장 좋은 case P-0.8-0인 경우를 기준으로 하여, 수직배인이 등간격인 case P-1-0인 경우는 약 2.8배, 수직배인이 설치되지 않은 case NP인 경우는 약 4.5배 정도 크게 계산되어 유동균일화의 정도가 좋지 않은 것으로 나타났다.
- (3) 수평배인이 5°의 경사각을 갖는 경우에는 경사각을 갖지 않는 경우에 비하여 유동균일화 계수가 큰 값을 나타내므로, 수평배인은 경사각을 갖지 않는 것이 덕트클러의 유동 균일화에 있어서 바람직하다.

REFERENCE

1. Lee. Y. I., Kim. I. B., and Kim. B. H., 1997, A Study for Large Capacity FGD System, KOPEC, J. Power Engineering, Vol. 29, pp. 6-17.
2. Lee. C. S., Choi. Y. S., and Yang. C. R., 1997, A Study for the Flue Gas Reheating Method of Wet FGD System for Thermal Power Plant, KOPEC, J. Power Engineering, Vol. 29, pp. 18-28.

3. Partankar, S. V., Pratap, V. S., and Spalding, D.B., 1974, Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Pipes, *J. Fluid Mech*, Vol. 62, pp. 539.
4. Partankar, S. V., Pratap, V. S., and Spalding, D.B., 1975, Prediction of Turbulent Flow in Curved Pipes, *J. Fluid Mech*, Vol. 67, pp. 583.
5. Han, T., Humphrey, J. A. C., and Launder, B. E., 1981, A Comparison of Hybrid and Quadratic Upstream Differencing in High Reynolds Number Elliptic Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 29, pp. 81-95.
6. Ludwig, J. C., Qin, H. Q., and Spalding, D. B., 1989, *The PHOENICS Reference Manual*, TR/200, CHAM.
7. Sharma, D., 1974, Turbulent Convective Phenomena Straight, Rectangular-Sectioned Diffusers, Ph.D Thesis, University of London.
8. Shim, J. W., Cho, M. T., Suh, S. H, and Yoo, S. S., 1996, Flow Visualization in the Branching Duct by Using Particle Imaging Velocimetry, *Proceeding of KSME(B)*, pp. 641-646.
9. Sugiyama, S., Yamamoto, M., Nishikawa, H., and Oda, Y., 1991, Numerical Investigations on Fully-Developed and Unsteady Flows in a Curved Duct, *JSME, Part B*, Vol. 57, pp. 18-24.
10. Myong, H. K., and Kobayashi, T., 1991, Numerical Simulation of Fully Developed Turbulent Flows in a Square Duct, *JSME, Part B*, Vol. 57, pp. 2538-2546.
11. Harloff, G. J., Smith, C. F., Bruns, J. E., and DeBonis, J. R., 1993, Navier- Stokes Analysis of Three-Dimensional S-ducts, *J. of Aircraft* Washington DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 30, pp. 526-533.