

배연탈질설비의 성능향상을 위한 가스혼합에 관한 연구

김봉환* · 류병남** · 강동구***

A Study on the Flue Gas Mixing for the Performance Improvement of De-NOx Plant

B. H. Kim · B. N. Ryu · D. K. Kang

Key words : Delta Wing(삼각익), De-NOx Plant(배연탈질설비), Vortex(와동), Mixing Effects(혼합효과), Evaluation Parameter(평가변수)

Abstract

De-NOx facility using Selective Catalytic Reduction method is the most widely applied one that removes NOx from flue gas emitted from combustion facility such as boiler for power generation, engine, incinerator, etc. Reductant, NH₃ or NH₄OH, is sprayed into flue gas to convert NOx into H₂O and N₂. Good mixing between flue gas and NH₃ is the most important factor to increase reduction in catalytic layer and to reduce unreacted NH₃ slip. Therefore, the development of mixer device for mixing effect, is one of the important part for SCR facility.

Objectives of this study are to investigate the relation between flow and concentration field by observation at the wake of delta-wing type mixer. At the first stage, qualitative measurement of flow field is conducted by flow visualization using laser light sheet in lab. scale wind tunnel. Also we have conducted the quantitative analysis by comparing flow field measurement using LDV with numerical simulation. On the basis of qualitative and quantitative analysis, we investigate the distribution of flow and concentration in flow model facility. The results of an experimental and computational examination of the vortex structures shed from delta wing type vortex generator having 40° angle of attack are presented. The effects of vortex structure on the gas mixing is discussed, too.

1. 서 론

선택적 촉매환원(Selective Catalytic Reduc-

tion)법에 의한 배연탈질설비는 발전설비용 보일러, 엔진, 소각로 등 연소설비에서 나오는 배기가스 중에서 질소산화물을 제거시키는 설비이다.

* 양산대학 건축기계설비과(원고접수일 : 98년 11월)

** 부산대학교 대학원

*** 현대중공업 산업기술연구소

SCR 탈질설비에서는 연소가스 내 질소산화물을 반응로내 촉매층에서 물과 질소로 환원시키기 위해서 환원제인 암모니아 가스(NH₃)나 암모니아수(NH₄OH)를 분사한다.⁽¹⁾ 이때 촉매층에서 반응을 촉진시키고 미반응된 암모니아를 줄이기 위해서는 연소가스와 암모니아 가스의 혼합이 잘 이루어져야 한다.⁽²⁾ 그러므로 덕트내 연소가스와 암모니아가스의 혼합촉진장치개발이 필요하다. 따라서 혼합기 후류의 유동형태에 대한 고찰과 이러한 유동형태가 배기가스와 암모니아 가스의 혼합에 미치는 영향에 대한 이해가 필수적이다. 산업설비에 있어서 가스 혼합에 관한 문헌연구⁽³⁾⁻⁽⁵⁾를 통하여 삼각익이 유동장에 적당한 위치에 놓인다면, 와동의 나선형 운동으로 인해서 생기는 높은 에너지를 주위의 느린 운동을 하는 유체에 전달하여, 와동 밖의 유체를 와동 중심으로 끌어들이고 와동 내부의 유체를 와동 밖으로 보내는 순환을 일으켜서 전체적으로 유체가 섞이게 되며, 또한 압력손실과 경계층의 크기가 작아서 항공기 엔진의 연료분사장치 등 산업용 설비의 혼합기로도 자주 쓰인다는 것을 알 수 있었다.^{(6)-⁽¹⁰⁾} 따라서 본 연구에서는 삼각익형 혼합기가 사용되어질 때, 혼합기의 후류에서의 유동장과 농도장의 관찰을 통하여 유동형태와 농도장의 관계 즉 와동이 가스혼합에 미치는 영향을 밝히고자 한다. 실험적 연구의 효율성을 고려하여 크게 3가지의 실험을 수행하였다. 첫 번째로 실험실 규모(lab. scale) 풍동에서 레이저 가시화막(laser light sheet)을 이용한 가시화실험, 두 번째로 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용한 유동장 측정 및 수치해석 결

과와의 비교실험 그리고 세 번째로 첫 번째와 두 번째의 실험결과를 토대로 한 실제 산업용 배연탈질설비의 1/10크기(bench scale) 유동실험모델에서의 실 유동분포와 농도분포의 검증실험을 수행하여 실험플랜트에 적용코자 한다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹²⁾

2. 실험장치 및 방법

2.1 혼합유동 가시화 실험

혼합기 후단의 유동형태에 대한 정성적인 파악과 수치해석 계산결과와의 비교를 위해서 레이저 가시화막을 이용한 가시화 실험을 수행하였다. Fig. 1은 가시화실험의 장치도이다. 광원은 5W 아르곤 이온 레이저(Coherent, Innova-70)를 사용하였고, laser vapor screen system(Aerometrics, LVS-180)을 이용하여 혼합기의 후단에 단면광을 평균유동에 수직으로 위치시키고, 혼합기의 전단에서 암모니아 가스 대신 입자발생기에서 공급되는 연기를 분사하였다. 이송장치로 레이저 가시화막을 혼합기의 후류 방향으로 단면이송을 하면서 얻어지는 화상을 거울을 이용하여 평균유동에 수직으로 설치되어 있는 CCD 카메라에 연결된 VCR에 녹화하였다. 가시화 실험시 평균유동의 유속은 여러차례의 예비실험을 통하여 와유동을 잘 관찰할 수 있었던 유속인 0.3m/s로 하였으며, 광원의 출력은 1W이다. 거리에 따른 유동형태를 관찰하기 위해서 혼합기의 무게중심인 지지점에서 100, 200, 400mm 떨어진 후류 단면을 주변광을

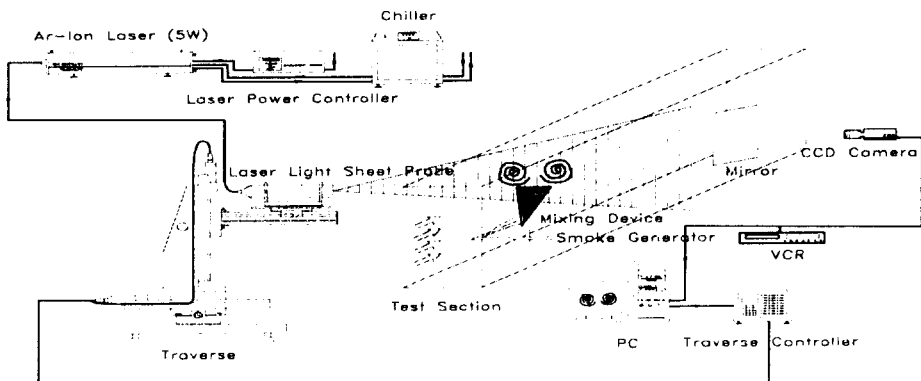


Fig. 1 Schematic diagram of mixing flow visualization experiment apparatus.

차단한 상태에서 CCD 카메라로 촬영하였다.

가시화 실험결과와 경우에 가시화 사진을 통해서 혼합기 후단에서의 유동형태의 뚜렷한 관찰이 어려우므로 이미지 보드를 이용하여 화상처리해서 계산결과와 비교하였다. 화상처리를 위해서 1/15초 간격으로 VCR에서 30화상을 얻어서 디지털화하였다. 디지털화된 화상은 256등급의 밝기를 가진 흑백화상으로 나타나며, 640×480화소(pixel)의 화상 크기를 가진다. 이러한 디지털화된 화상을 같은 위치의 화소들을 평균하고 기준밝기를 정하여 연기의 화상만 남게 하였고, 여기에 밝기의 단계별로 임의의 색깔을 지정하여, 그래픽화 일화하여 출력하였다.

2.2 LDV를 이용한 혼합기 후류 유동장 측정실험

Fig. 2는 혼합기 후류의 유동장 측정을 위한 실험 장치도이다. 풍동 시험부의 단면크기는 200mm(W)×400mm(H)이고 벽면은 유리와 아크릴로 제작하였다. 실험과 수치해석에 사용된 삼각익형 혼합기의 형상과 크기를 Fig. 3에 나타내었다. 평균유동의 방향을 X축으로 정하고 이에 수직인 축을 Y, Z축으로 하였다. LDV(Aerometrics, Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 유속을 측정하기 위해 풍동 입구에 설치된 입자발생기에서 발생한 연기를 주입하였으며, 입자의 추종성을 고려하여 평균유속을 2.4 m/s로 해서 혼합기

의 지지점에서 25mm 떨어진 지점의 단면에서 혼합유동장을 측정하였다. 3차원 유동장 측정을 위하여 풍동의 측면과 윗면에서 각각 1,036 지점씩 유속과 난류강도를 측정하였고 각 지점의 데이터는 2,000개씩 평균하였다.

2.3 유동모델 실험

혼합기의 설치에 따라 주입된 암모니아 가스의 촉매층 전단에서 혼합정도를 파악하기 위해 유동모델실험을 수행하였다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹²⁾ Fig. 4는 본 실험적 연구에 사용된 아크릴 실험장치를 나타내었으며 실제 산업용 배연탈질설비의 1/10크기(bench scale)로서, 덕트단면의 크기는 400mm(W)×200mm(H)이다. 측정대상유동과 센서와의 열전달을 속도값으로 환산하여 유속을 측정하는 열선

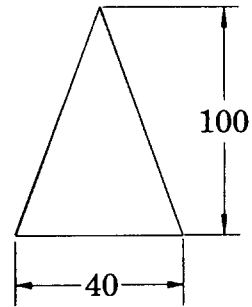


Fig. 3 Geometry and dimension of delta wing type mixer. [unit : mm]

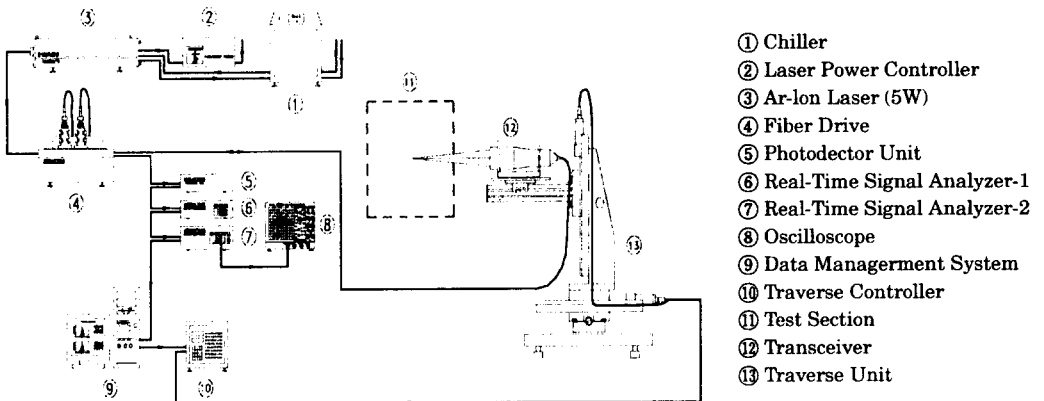


Fig. 2 Schematic diagram of flowfield measurement apparatus using LDV.

풍속계와 가스분석기(IMR 3000P)를 이용하여 각 혼합기의 후단과 촉매층에서의 유속분포 및 농도 분포를 측정하였으며, 모델의 측면방향을 X축, 깊이방향을 Z축으로 설정하였다. 혼합기 후단에서의 측정간격은 X, Z방향으로 각각 25mm, 20mm로 하였으며 촉매층에서는 45mm, 20mm로 실험을 수행하였다. 측정된 유속 및 농도분포는 아래와 같이 각 측정단면에서의 평균유속과 평균농도로 나누어 데이터를 처리하였다.^{(11)~(13)}

$$V_n = V_i / V_m \quad (1)$$

$$C_n = C_i / C_m \quad (2)$$

여기서, C_i : 각 측정점에서의 농도값, ppm
 C_m : 측정단면에서의 평균 농도값, ppm
 C_n : 정규화된(normalized) 농도값
 V_i : 각 측정점에서의 속도값, m/s
 V_m : 측정단면에서의 평균속도값, m/s

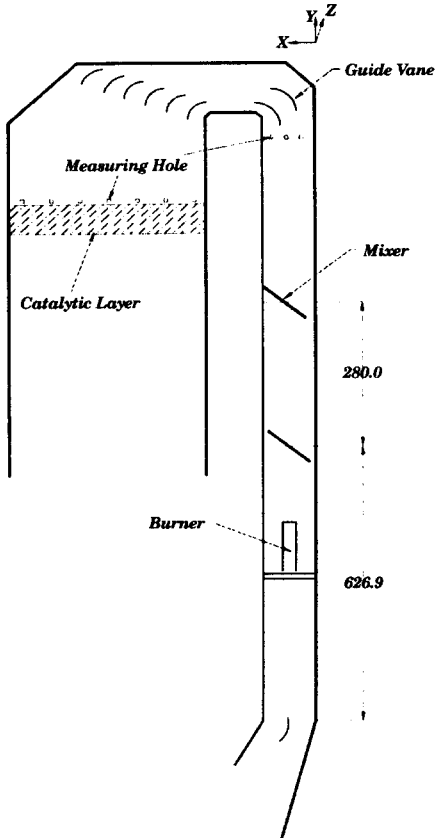


Fig. 4 Schematic diagram of Selective Catalytic Reduction.[unit : mm]

V_n : 정규화된(normalized) 속도값

산업용 배연탈질장치에서는, 암모니아 가스 (NH_3)가 분사되나 경제성과 안정성을 고려하여 본 연구에서는 일산화탄소(CO)가스를 주입하였으며 유동조건도 레이놀즈수를 통한 상사를 하여 실험을 수행하였다.⁽¹³⁾

3. 혼합기 후류의 유동 및 가스혼합 해석

3.1 난류모델

혼합기 주위의 유동해석은 다음과 같은 지배방정식을 설정하여 수행하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu_{eff}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (4)$$

여기서, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 를 나타낸다.

본 연구에서, 아래와 같은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 혼합기 후단의 유동을 해석하였다.

$$\rho u_i' u_j' = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

난류점성계수는 $k-\epsilon$ 방정식을 이용하여 계산되는 viscosity scale($k^{1/2}$)과 length scale($\frac{k^{3/2}}{\epsilon}$)로부터 구해진다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

여기서, G_k 는 k 의 생성 항으로 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t (\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

Table 1. Constants in turbulence model

	C_1	C_2	C_3	σ_k	σ_ϵ
Value	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

그러므로, 난류점성계수는 다음과 같다.

$$\mu = \rho C_3 \frac{k^2}{e} \tag{9}$$

여기서, 상수 $C_1, C_2, C_3, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 는 경험상수로 Table 1과 같다.

3.2 가스혼합 모델

가스혼합 해석에 사용된 식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} J_i + R_i + S_i \tag{10}$$

이고 여기서, m_i 는 화학종의 질량분율, R_i 는 화학반응에 의한 가감질량율이고 S_i 는 소산된 상(dispersed phase)으로부터 더해진 생성율이며 J_i 는 농도구배에 의해 발생하는 화학종 i 의 확산율을 나타내며 다음 식에서 구해진다.^{(6)~(8)}

$$J_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu}{Sc_t}) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \tag{11}$$

여기서, Sc_t 는 유효 Schmidt 수이고, $D_{i,m}$ 은 혼합에 있어서 화학종 i 의 확산계수이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 와동특성 및 가스 혼합도 평가기준

혼합기에서 발생된 와동이 가스혼합에 미치는 영향의 정량적 고찰을 위해서 다음과 같은 와동과 가스혼합과의 평가변수를 선정하였다.

A. 최대와도(peak vorticity)

최대와도는 와동의 중심에서 발생하고 그 값은 와동집중(vortex concentration)을 나타내며 아래와 같은 식에 의해서 구한다.⁽¹⁰⁾

$$\omega_x = (\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}) \tag{12}$$

여기서, w 는 속도벡터의 z 성분이고 v 는 y 성분을 나타낸다.

B. 혼합균일도(mixing uniformity)

암모니아 가스의 균일한 혼합 정도를 나타내는 혼합균일도를 다음과 같이 정의하였다.⁽⁷⁾

$$\sigma = \frac{1}{A_{duct}} \int (\frac{M_i}{M_m} - 1)^2 dA \tag{13}$$

식(13)은 각 계산점에서의 가스 농도값을 면적을 상관시킨 표준편차를 의미한다.

C. 혼합면적비(ratio of mixing area)

혼합면적비를 아래와 같이 주위 유동과 혼합된 암모니아 가스가 차지하는 면적과 덕트의 면적으로 구하여 와동이 가스혼합에 미치는 영향을 평가하였다.⁽¹⁴⁾

$$AR = \frac{A_{NH_3}}{A_{duct}} \times 100 \tag{14}$$

여기서, σ : 암모니아 가스의 질량분율의 분산
 A_{duct} : 덕트의 단면적
 A_{NH_3} : 주위 유동과 암모니아 가스의 혼합으로 이루어진 면적
 M_i : 암모니아 가스의 국소질량분율
 M_m : 암모니아 가스의 평균질량분율이다.

4.2 유동방향으로의 유속 및 농도분포

Fig. 5는 유동방향으로의 가시화실험과 수치해석 계산결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이, 유속 분포와 농도분포의 계산결과가 가시화실험의 유동분포와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 혼합기 후단에서 분사된 연기가 받음각과 단면적 와동유동장의 특징인 와동양력(vortical lift)에 의해서 하류로 갈수록 위로 상승을 하면서 주위 유동과 혼합이 이루어지며, 혼합의 폭도 점점 커지는 것을 알 수 있다.

4.3 수직단면 방향으로의 유속 및 농도 분포

혼합기에서 100, 200, 400mm의 거리에 따른 가시화실험, 유동장측정, 그리고 수치해석결과와의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 가시화 실험결과는 앞서 언급한 것과 같이 이미지보드를 이용하여 화상처리를 하였다. 가시화결과에서, 혼합기 후단의 일반적인 유동형태인 축대칭의 쌍와동(vortex pair)

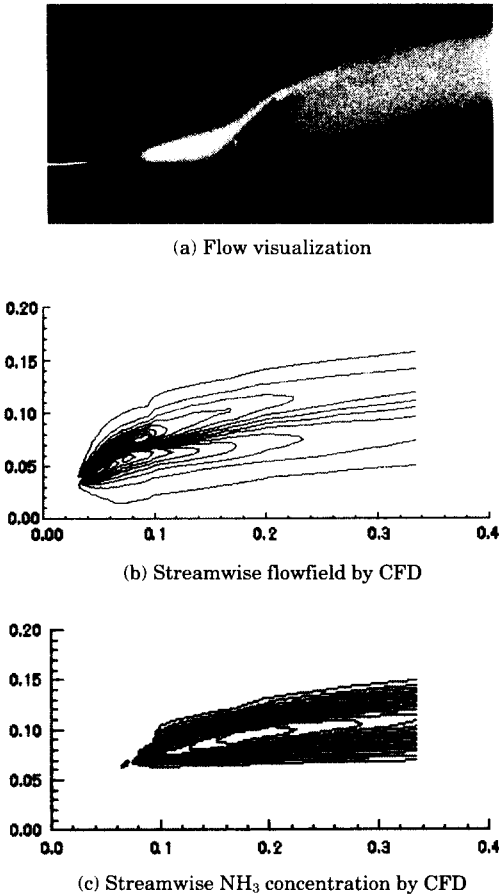


Fig. 5 Comparison of streamwise results between flow visualization and computation.

이 발생하고 혼합기에서 거리가 멀어질수록 와동 중심에 밀집된 높은 가스농도의 면적이 줄어들며 이는 암모니아가스와 주위 유동과의 혼합이 진행되어지는 것을 의미하며 와동의 크기도 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 계산결과에서 혼합기에서 거리가 멀어질수록 와동의 중심이 위로 상승하고 가시화 실험결과에서 본 것과 같이 와동의 폭이 커지며 점점 발달해 가는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 와동의 발달에 비례하여 농도장의 암모니아 가스의 혼합면적도 거리에 비례하여 점점 커지며 와동의 크기와 암모니아가스의 혼합이 이루어지는 영역이 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며 이를 통해서 와동이 암모니아 가스의 혼합에 지배적인 변수임을 알 수 있다.⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾ 이는 혼합기의 강

한 선회유동속도를 갖는 와동을 일으켜서 주위 유동을 와동의 중심에 끌어들이고 와동 중심의 암모니아가스를 와동 밖으로 내보내는 혼합을 촉진시키며 와동이 가지는 선회유동으로 인해서 혼합기 후단의 유동진행을 억제하여 암모니아 가스와 주위 유동과의 혼합이 이루어지는 체류시간을 길게 하고, 혼합이 이루어지는 접촉면적을 크게 하기 때문이다. 와동의 선회유동에 의한 혼합기 후단의 유동진행 억제는 Fig.7의 유속결손영역의 발생을 통해서 알 수 있다. Fig. 7은 혼합기에서 100mm 떨어진 거리에서 LDV로 측정된 속도장의 결과이다. Fig. 6에서 본 바와 같이 와동이 발생하며 와동의 선회유동에 의한 유속결손영역(velocity deficit region)이 발생하고 이 영역이 와동의 폭과 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 가스의 혼합이 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다.⁽¹⁴⁾

4. 4 와동이 가스혼합에 미치는 영향평가

Fig. 6과 Fig. 7으로부터 속도벡터에서의 와동 폭과 농도장에서 암모니아 가스의 혼합면적이 거의 일치함을 알 수 있으며, 이를 통하여 와동이 암모니아와 배연가스와의 혼합에 지배적인 변수임을 알 수 있다.⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾ 와동과 가스혼합과의 상관관계를 정량적으로 평가하기 위해 앞에서 언급한 최대와동⁽⁷⁾와 혼합균일도⁽¹⁰⁾ 및 혼합면적비⁽¹⁴⁾를 도입하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 혼합기에서의 거리에 따른 최대와동, 혼합균일도, 그리고 혼합면적비의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 거리에 비례하여 최대와동과 혼합균일도는 줄어들고 혼합면적비는 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 와동의 중심에 형성된 높은 농도의 암모니아가스와 와동의 혼합효과에 의해서 거리가 멀어짐에 따라서 혼합이 진행되어 전단면에 걸쳐서 고르게 분포되어지는 것을 의미한다

삼각익의 유동특성에 관한 연구결과^{(15),(16)}에 의하면, 받음각을 0°에서 점차로 증가시켜 30°일 경우에는 삼각익의 양 모서리에서 형성된 나선형 와류가 하류방향으로 발달해 나아가다가 삼각익 끝단 뒤쪽에서 와류가 붕괴되면서 유동교란이 심한 후류영역을 형성하였다. 받음각이 40°일 경우에는 30°일 때보다 나선형 와류의 크기와 세기가 증가

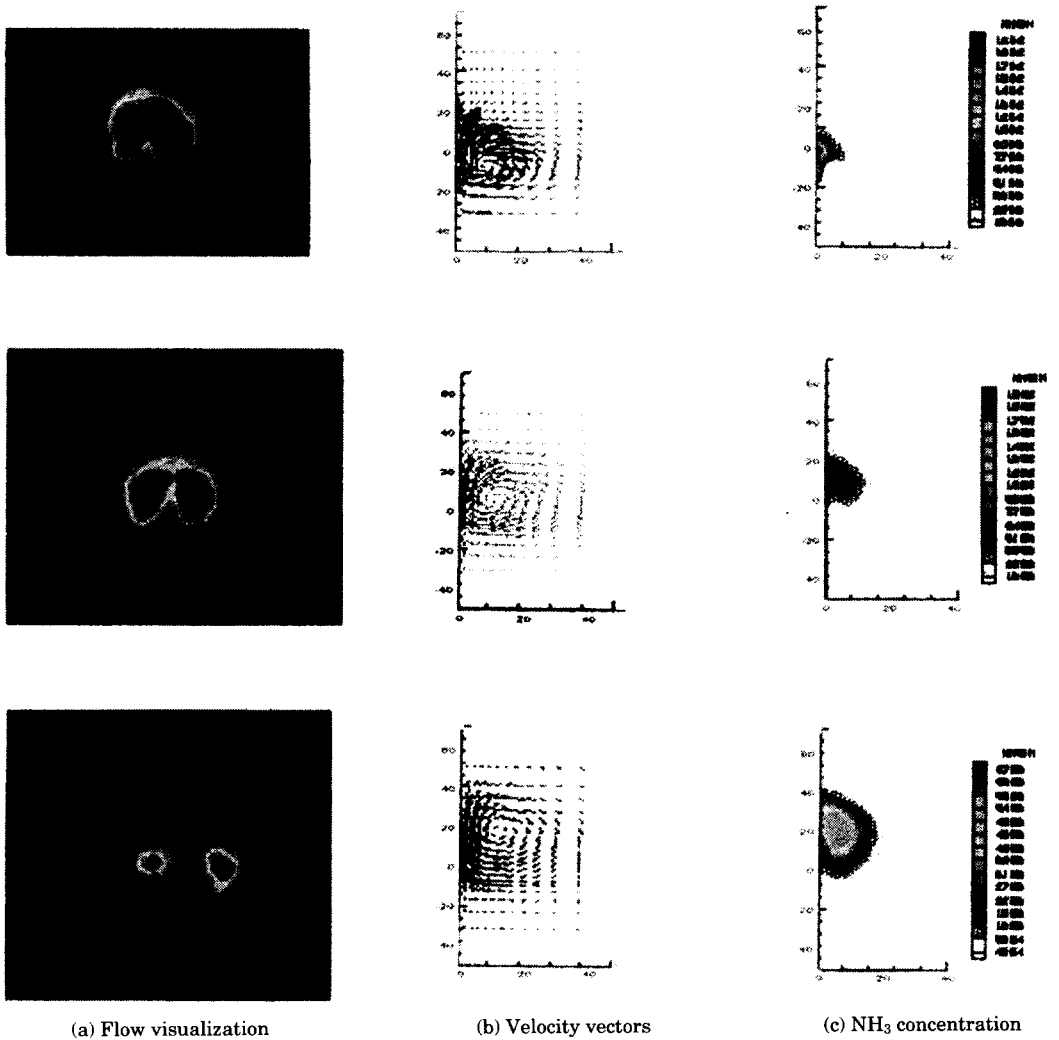


Fig. 6 Comparison of crosswise results between flow visualization and computation.

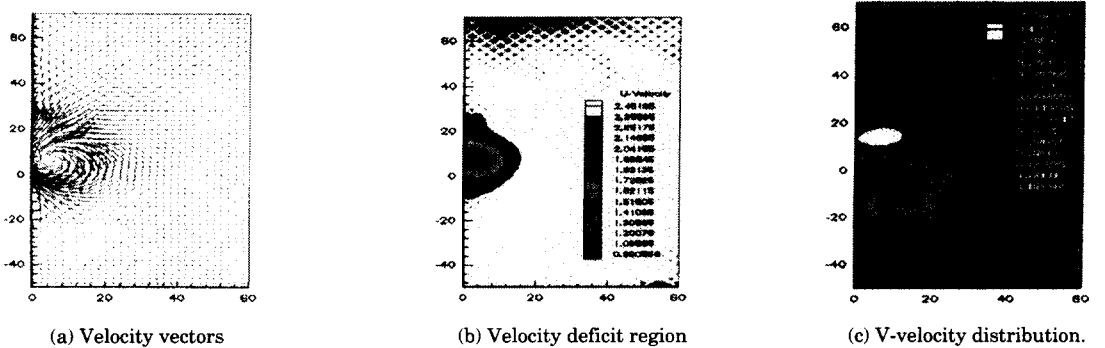


Fig. 7 Flowfield measured by LDV.

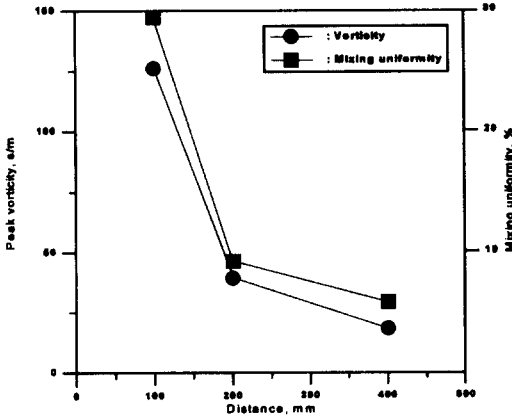


Fig. 8 Comparison of peak vorticity and mixing uniformity.

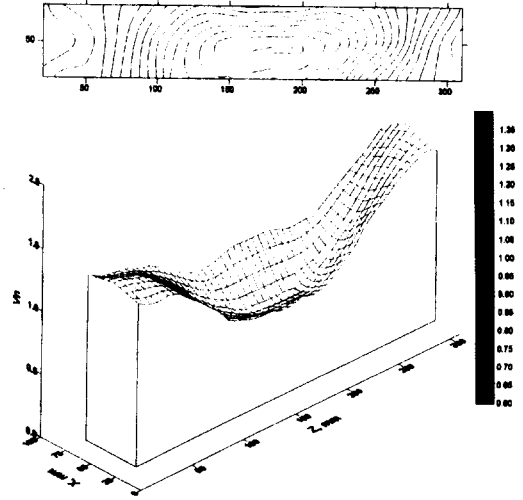


Fig. 10 Velocity distribution normalized by mean velocity at inlet of mixer.

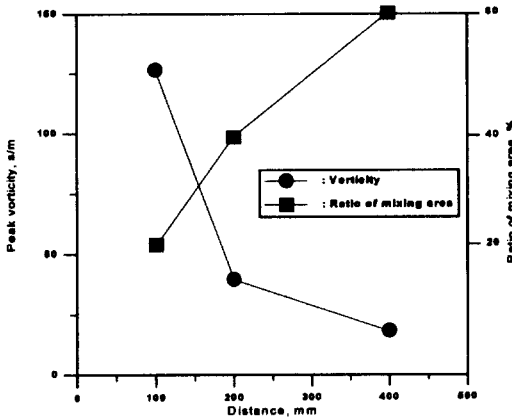


Fig. 9 Comparison of peak vorticity and ratio of mixing area.

하여 와류가 선명하게 관찰되었으며 와류의 붕괴 후 삼각의 끝단에서의 후류폭도 증가하였다. 받음각이 더욱 더 증가되었을 때, 30°와 40°의 경우처럼 삼각의 뒷면에서 나선형 와류가 형성되지 않았으며 삼각의 뒤에서 폭이 넓은 후류가 형성되면서 유동혼란을 가져온다. 본 연구의 결과로서 받음각이 30° ~ 40° 근처에서 나선형 와류가 삼각의 양모서리 선단에서 발생하고 받음각이 나선형 와류의 형성에 중요한 변수임을 알 수 있었다.^{(15),(16)}

4.5 유동모델실험

실험실 규모(lab. scale)의 가시화 실험 및 LDV

에 의한 유속측정 실험 그리고 수치해석적 연구결과를 실제 배연탈질설비에의 적용에 앞서, 실제 배연탈질설비의 1/10 축소 유동모델실험(bench scale)을 통하여 삼각익형 가스혼합기의 혼합효과에 대한 검증실험을 행하였다.^{(11),(12)} 유동조건은 레이놀즈수(약 1.0×10^5)를 통한 유동상사를 고려하여 선정하였으며, 평균유속은 15.57 m/s이고 이때의 유속표준편차는 0.24이다. Fig. 10은 혼합기에 유입되는 유속을 평균유속으로 나눈 정규화된 유속분포를 나타낸다. 중간지점의 유속보다 벽쪽의 유속이 높으며 이는 유동 상류방향에 있는 버너(Fig. 4 참조)의 영향 때문이다. 버너가 일종의 장애물 역할을 하여 유속결손이 발생하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 덕트내에 설치된 삼각익형 가스혼합기의 후단과 배연탈질설비의 촉매층 입구에서의 유속 및 농도분포를 나타낸다. 혼합기 후단에서 유동분포가 바깥 벽쪽(X=0)영역의 유속이 높고 안쪽이 낮은 약간의 선형적인 유속분포를 보이며, 농도분포는 평균유동장과 반대의 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 혼합기들이 Fig. 4의 구성도에서 보는 것과 같이 유동방향에 대해서 기울어진 받음각을 가지고 있기 때문으로 생각되어지며 이러한 경향은 가시화 실험과 수치해석결과에서도 관찰할 수 있다. 농도분포가 유동장과 반대의 경향을 보이는 것은 단면을 균일한 검사체적

(Control Volume)으로 나누었을 때, 일정농도의 가스가 유입되더라도 검사체적 내에서의 유속이 증가한다는 것은 유량의 증가를 의미한다. 이는 곧 농도의 감소를 가져오기 때문에 농도장의 분포가 유동장의 분포와 반대의 경향을 가지는 것으로 판

단된다. 이상의 실험결과로부터 단면방향의 와동이 주위유동과 가스의 혼합을 촉진시키는데, 이는 크게 다음과 같이 두가지 이유 때문으로 생각된다. 첫째로, 와동이 가지는 성질에 의해서 주위유동을 와동의 중심으로 유입시키고 와동중심에 있는 가

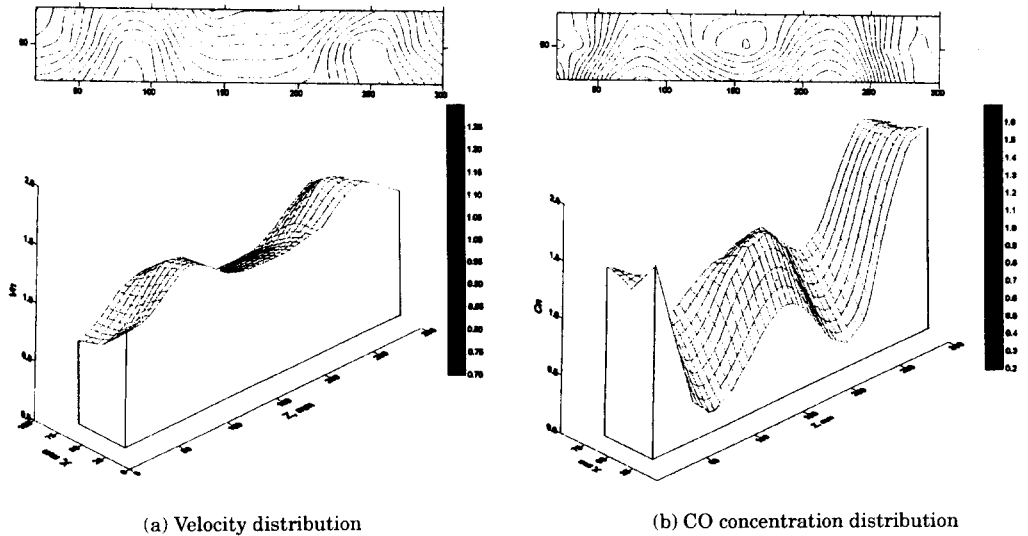


Fig. 11 Velocity and CO concentration distribution normalized by mean value at the rear of delta-wing type mixer.

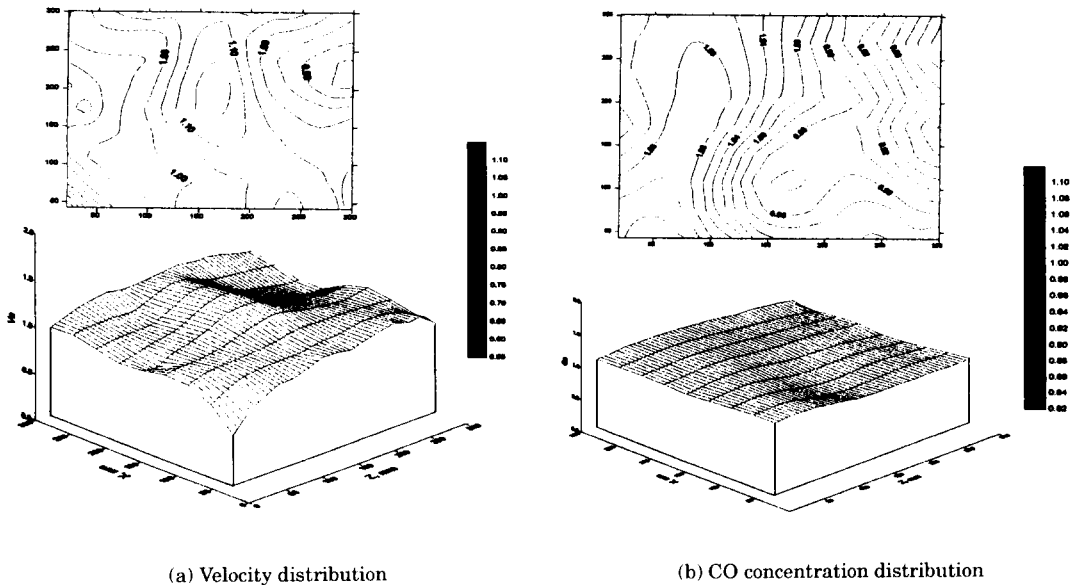


Fig. 12 Velocity and CO concentration distribution normalized by mean value at the front of the catalytic layer.

스를 주위로 내보내는 강제혼합(forced mixing)이 이루어지는 것이며, 둘째는 혼합기 뒤에서 가스가 제트(jet)의 형태로 덕트 내부로 분사되는데, 분사된 가스는 와동에 의하여 진행상의 방해받게 되어 덕트 내에 체류하는 시간(residence time)이 길어지고 이에 따라 가스가 주유동과 혼합이 이루어지는 시간이 연장되어 혼합효과가 더욱 크다는 것이다.

5. 결 론

레이저를 이용한 가시화실험, 유동장측정실험, 유동모델 검증실험 그리고 수치해석적 연구를 통한 가스혼합에 미치는 와동의 영향에 대한 본 연구에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 삼각익형 혼합기 후단에서 쌍와동(vortex pair)이 형성되어 주위 유동과 와동 내부의 유체를 순환시키는 선회유동을 일으키면서, 하류로 지속적으로 발달해 가는 것을 볼 수 있었다.
- (2) 와동의 발달에 따라 암모니아가스의 혼합이 비례하며, 와동의 크기와 가스혼합면적이 거의 일치함을 통해서 혼합기 후단에서 발생한 와동이 암모니아 가스의 혼합에 지배적인 변수임을 알 수 있었으며, 이는 와동이 암모니아 가스와 주위 유동과의 혼합시간을 길게 하고 강한 유동속도를 갖는 선회유동을 일으켜서 혼합을 촉진하기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 와동에 의한 혼합기 후단에서의 유속결손영역에서 가스의 혼합이 주로 이루어지는 것을 수치해석과 유동장 측정결과와의 비교를 통해서 알 수 있다.
- (4) 혼합기에서의 거리에 비례하여 최대와도와 혼합균일도는 줄어들고 혼합면적비는 증가하는 것을 볼 수 있었다.

기호설명

- A_{duct} : 덕트의 단면적, mm²
- A_{NH_3} : 덕트내 암모니아가스 면적, mm²
- AR : 혼합면적비(ratio of mixing area)
- C_z : 각 측정점에서의 농도값, ppm
- C_m : 측정단면에서의 평균 농도값, ppm

- C_n : 정상화된(normalized) 농도값
- L : 혼합기에서 하류방향으로의 거리, mm
- M_i : 암모니아 가스의 국소질량분율
- M_m : 암모니아 가스의 평균질량분율
- V_i : 각 측정점에서의 속도값, m/s
- V_m : 측정단면에서의 평균 속도값, m/s
- V_n : 정상화된(normalized) 속도값
- ΔV_{max} : 최대평균유속, m/s
- α : 받음각(angle of attack), °
- σ : 혼합균일도(mixing uniformity)
- σ_v : 속도표준편차

참고문헌

- 1) H. Gutberlet and B. Schallert, 1993, Catal. Today, Vol. 16, NO. 207.
- 2) N. Imamura, et al., "Recent Progress and New Application of NOx Control Facility Using Selective Catalytic Reduction(SCR)", Technical Review of Kawasaki, Vol. 104, No. 12, pp.70~77, 1989.
- 3) P. K. Chang, "Separation of Flow", Pergamon Press Inc., 1978.
- 4) H. J. Lugt, "Vortex Flows in Nature and Technology", pp. 81~83, 1983.
- 5) S. Leiborich, "Vortex Stability and Breakdown : Survey and Extension", AIAA J., Vol. 22, No. 9, pp. 1192~106, 1984.
- 6) Y. Yamane and Y. Ando, "A Numerical Study on Mixing of Supersonic Flow Field with Parallel Injection through Ramp Nozzle", AIAA Paper No. 94-2944, 1994.
- 7) J. M. Donohue and J. C. McDaniel Jr., "Complete Three-Dimensional Multiparameter Mapping of a Supersonic Ramp Fuel Injector Flowfield", AIAA J., Vol. 34, No. 3, pp. 455~462, 1996.
- 8) James M. Donohue, James L. McDaniel Jr., and Hossein Haj-Hariri, "Experimental and Numerical Study of Swept Ramp Injection into a Supersonic Flowfield", AIAA J., Vol. 32, No. 9, Sep., 1994.
- 9) H. Higuchi, R. W. Anderson and J. Zhang, "Three-Dimensional Wake Formations Behind a

- Family of Regular Polygonal Plates”, *AIAA J.*, Vol. 34, No. 6, pp. 1138~1145, 1996.
- 10) J. Wendt and W. R. Hingst, “Flow Structure in the Wake of a Wishbone Vortex Generator”, *AIAA J.* Vol. 32, No. 11, pp. 2234~2240, 1994.
 - 11) I. H. Ruscheweyh, “Model Test for Flow Regulation and NH₄OH-Mixing Process in the De-NO_x Plant “Sung Nam”, Report R 619/1295, RWTH Aachen Institute of Steel Construction Department of Wind Engineering.
 - 12) Industrial Gas Cleaning Institute, INC, “Gas Flow Model Studies”, Publication No. EP-7.
 - 13) The Brochure of KWH Co., “Optimization of Flue Gas Lines De-NO_x Reactors”.
 - 14) G. Raman, “Supersonic Jet Mixing Enhancement Using Impingement Tones from Obstacles of Various Geometries”, *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 454-462, 1995.
 - 15) 김봉환, “NH₃ 혼합장치의 모형실험결과보고서 - 삼각익(Delta wing)의 유동가시화”, 현대중공업(주), 1993.
 - 16) Bongzoo Sung, “Analysis of the Vortical Flows around a 60 Degree Delta Wing with Vortex Flap”, Ph. D Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1985.

저 자 소 개



김봉환(金奉煥)

1958년 2월 19일 출생. 1976년 3월~1980년 2월 부산대학교 기계설계공학과. 1980년 3월~1982년 2월 부산대학교 기계공학과(석사). 1988년 3월~1993년 2월: 부산대학교 기계공학과(박사). 1982년 1월~1997년 2월 현대중공업 산업기술연구소 근무. 1997년 3월~현재: 양산대학 건축기계설비과 교수. 관심분야: -환경 및 배관 유체, 유동여기진동



류병남(柳炳男)

1965년 9월 1일 출생. 1986년 3월~1990년 2월 부산대학교 기계공학과. 1990년 3월~1992년 2월 부산대학교 기계공학과(석사). 1992년 3월~1999년 2월 현대중공업 산업기술연구소 근무. 1999년 3월~현재 부산대학교 기계공학과(박사과정). 관심분야: -에너지환경, 유동충소각



강동구(姜東求)

1970년 11월 3일 출생. 1990년 3월~1992년 2월 부산대학교 생산기계공학과. 1992년 3월~1994년 2월: 부산대학교 기계공학과(석사). 1994년 3월~현재: 현대중공업 산업기술연구소. 근무관심분야: -유체유동계측-particle dynamics & control을 통한 대기오염방지