

질소 산화물 저감용 촉매환원반응기에서 환원제의 혼합특성 연구

박주현, 김영봉*, 최상민**

*한국과학기술원 기계공학과 대학원, **한국과학기술원 기계공학과

A Study on the Mixing of Reducing Agent in a Selective Catalytic Reduction Reactor for Reducing NOx

Ju Hyun Park, Young Bong Kim*, Sangmin Choi**

*KAIST, **KAIST

1. 서론

배출되는 질소 산화물을 제거하기 위한 방법은 크게 연소 전 처리와 연소 조건의 개선, 연소 후 처리의 3가지 분야로 나눌 수 있으며, 이러한 방법은 단독으로 사용되기도 하고 높은 제거 효율을 위하여 혼합되어 사용되기도 한다. 하지만 효율 측면에서 연소 전 처리와 연소 조건의 개선에 의한 저감 효율은 최대 60%를 넘지 못하기 때문에 대다수의 화력발전소나 소각시설에서는 연소 후처리 방법을 사용하고 있다. 이런 연소 후처리 방법은 중 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)은 높은 효율로 인하여 비선택적 촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)보다 많이 사용되어지고 있다. SCR설비는 환원제로 암모니아(NH3)나 요소(CO(NH2)2)를 분사하고 촉매를 이용하여 질소 산화물(NOx)을 질소와 산소로 환원하는 방법이다.

이러한 SCR설비의 경우 환원제와 배기가스의 충분한 혼합이 중요한 요소로 작용하게 되므로 다수의 시설에서는 환원제를 20 ~ 30% 액상으로 보관하고 있다가 필요량을 기화시켜 기체 상태로 분무하게 된다. 하지만 이 경우, 보관과 연소가스가 흐르는 덕트로 분사시키는 작업을 나누어서 진행하기 때문에 부가적인 설비가 필요하게 된다. 이러한 점을 개선하기 위한 방법으로 액상의 환원제를 직접 분무하는 방법이 제시되고 있으며, 본 연구에서는 기체상태의 환원제를 분사하는 설비에서 액상의 환원제를 직접 주입할 경우 환원제와 배기가스간의 혼합특성을 파악하기 위하여 실시하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

다음의 그림 1은 연구를 위해 제작된 풍동 모형이다. 실험 장치는 송풍기(Blower), 유동 안정화 장치(Stabilizer), 덕트(Duct), 분무장치(Atomizer)로 구성되어 있다. 그림 2는 유동 안정화 장치와 덕트를 나타내고 있으며, 유동 안정화 장치는 송풍기에서 시작된 유동을 균일하게 만들고, 덕트에서는 탄산수의 분사와 CO2의 농도 측정이 행해진다. 안정화 장치는 디퓨저(diffuser), 허니콤(honeycomb), 가는 철망(screen), 수축부(contraction part)로 구성되어 있고, 덕트는 0.3x0.6 m, 길이 2.5 m의 아크릴로 제작하였다.

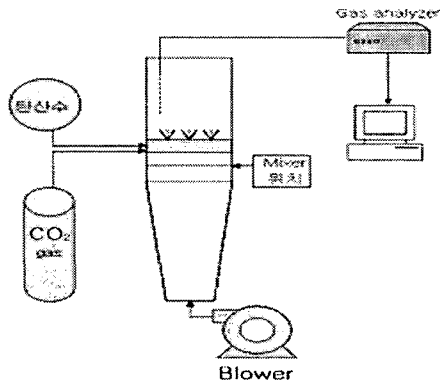


Fig. 1 Schematics of experiment system

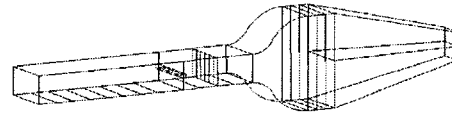


Fig. 2 Design of assembled duct and stabilizer

그림 3은 실제 설비에서 분무장치와 본 실험에서 덕트 내에 설치된 스프레이 분무장치를 나타낸 것이다.

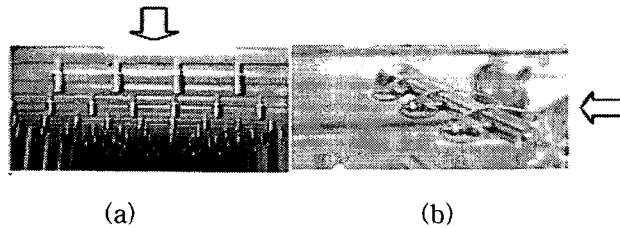


Fig. 3 Overview of AIG and atomizer in duct
 (a) In real plant (200MW thermal power plant)
 (b) In experimental device (←:main gas flow)

분무장치(atomizer)는 유동방향으로 설치하였고 충분한 분사각을 확보하기 위해 6개의 분사구가 있는 광각 분사 모델을 사용하였다. 그림 3과 같이 실제 암모니아 주입장치(Ammonia Injection Grid, AIG)처럼 덕트를 가로질러 설치한 직경 44mm의 실린더에 3개의 분무장치를 부착하였다. 사용한 모델은 (주)한미노즐³⁾에서 제작한 AD100 set을 분무장치로 사용하였다. 이 장치에서 분사되는 액적의 지름을 Sympatec의 Helos Vario를 사용하여 측정하여 그림 4에서 나타내었다. 액적의 지름은 $100\mu\text{m}$ 부근에서 가장 많은 분포를 나타내었으며, SMD(Sauter Mean Diameter)는 $32\sim 37\mu\text{m}$ 로 측정되었다. SMD는 액적군의 총 체적에 대한 총 표면적의 비율로 미립화 정도를 나타내는 척도이다.⁴⁾

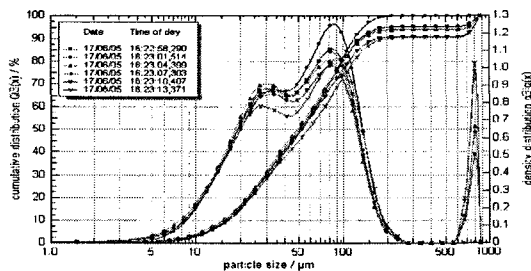


Fig. 4 size distribution of the spray droplet

CO₂ 농도 측정에는 Rosemount사의 880A model을 사용하였고, 측정된 데이터는 NI사의 DAQcard - AI - 16XE - 50 model 을 PC에 연결하여 획득하였다.

그림 5는 고정식 혼합기를 나타낸 것으로 지름 14mm의 봉에 46×40mm의 평판 48개를 붙여 유동을 교란시켜 혼합을 촉진시킬 목적으로 유동 중에 설치하였다.

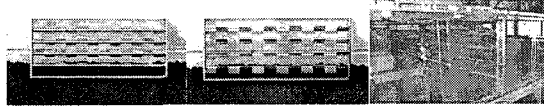


Fig. 5 Static mixer (front, rear, setup)

2. 2 실험 방법

샘플링에서는 유동의 유선을 왜곡시키지 않는 범위에서 샘플링을 하기 위해 등속 샘플링 (iso-kinetic sampling)을 하였다.⁵⁾ 이를 위해 그림 6와 같이 프로브 선단에 30°로 테이핑 가공한 팁을 부착하였다.

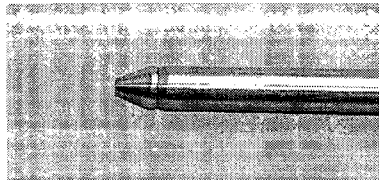


Fig. 6 Head of the probe

샘플링은 덕트 단면을 16구간으로 나누어 각 구간에서 일정 시간 샘플링 후 이동하는 방식으로 덕트 출구 근처에서 측정을 하였다. 또한 같은 자리에서 마노미터로 동압과 정압의 차이를 측정하여 유속을 측정하였다.

- 탄산수 분사

액적의 거동에는 액적의 열전도가 원활히 이루어져서 내부의 온도구배를 무시하고 균일한 온도를 지니는 모델(Infinite liquid-conductivity model)을 적용할 수 있다. 실제 연소가스가 흘러가는 덕트 내부는 촉매 층의 탈질 효율을 높이기 위해 300℃ 이상으로 가열이 되기 때문에 암모니아 수용액을 분사시키는 경우 액적의 열용량이 매우 작고, 덕트 내부의 연소 가스의 양이 비해 적은 양이 분사되기 때문에 암모니아의 증발은 급격하게 된다. 고온의 가스 중에 분사된 액적은 다음과 같은 거동을 하게 된다.

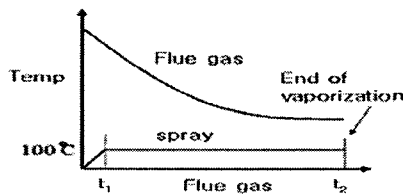


Fig. 7 Temp. behavior of flue gas and spray

$$t_1 = \frac{\rho_p C_p d_p^2 \Delta T_p}{12 k_g \Delta T_{LMTD}} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{\rho_p \lambda d_p^2}{8 k_g \Delta T_{LMTD}} \quad (2)$$

$$t_{evap} = t_1 + t_2 \quad (3)$$

where $\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$,

λ : 물의 증발 잠열

이때 t_1 은 분사 직후부터 액적이 끓는점에 도달하는 시간이고, t_2 는 끓는점에서 완전히 증발이 이루어질 때까지의 시간이다. 고온의 공기에 직경이 100 μ m로 물 액적을 분사한다고 가정하고 이 식을 적용하면 $t_{evap} = 1.7 \times 10^{-7}$ sec의 시간이 소요된다. 즉 입경이 작은 액적의 경우 분사 즉시 가속과 함께 증발이 일어난다. 이와 유사하게 탄산수를 분사하는 경우는

대기압과 저장용기에서의 압력차이로 인해 대부분의 CO_2 가 분사 즉시 기화가 일어나서 덕트 유동과의 혼합이 이루어진다. 따라서 실험에서는 온도차에 의한 급격한 암모니아 기화를 압력차에 의한 CO_2 의 기화로 모사하였다.

3. 실험

3.1 측정 방법 및 보정

매 경우 측정된 자료로 혼합 정도를 비교하기 위해 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 도입하였다.

$$CV = \frac{\text{Standard Deviation}}{\text{Average}} = \frac{S}{x} \quad (4)$$

CV는 무차원수로서 표본의 산술평균에 대한 표준편차의 크기로써 평균의 차이가 있더라도 상대적인 분산도를 비교할 수 있다. 이 실험에서는 덕트 각각의 단면에서 측정된 CO_2 의 농도에 대한 산술평균과 표준편차를 구해서 평균 농도가 다르더라도 혼합의 균일도를 비교할 수 있도록 각각의 case에 대해 CV를 구하였다.

3.2 가스 상의 CO_2 분사 및 측정

먼저 가스 상태 CO_2 의 혼합정도를 측정하였다. 덕트 내부의 유속을 4, 6, 8m/s로 바꾸면서 일정량의 CO_2 가스를 주입하여 혼합정도를 측정하였다. 각각의 유속에서 완전히 혼합되는 경우 0.01%, 0.02%의 농도가 측정되도록 계산된 양의 CO_2 를 주입하였다. 다음은 측정 결과이다.

Table 1 CO_2 concentration distribution at 4m/s

distance	concentration	CV
0.6m	0.0094%	1.288542
	0.0230%	1.052611
1.4m	0.0114%	0.812637
	0.0251%	0.58395

Table 2 CO_2 concentration distribution at 6m/s

distance	concentration	CV
0.6m	0.0107%	1.081467
	0.0221%	0.983541
1.4m	0.0119%	0.754019
	0.0193%	0.601317

Table 3. CO_2 concentration distribution at 8m/s

distance	concentration	CV
0.6m	0.0106%	1.031706
	0.0218%	0.953082
1.4m	0.0091%	0.698116
	0.0194%	0.57657

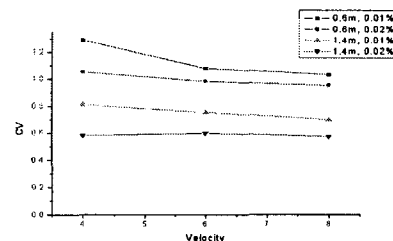


Fig. 8 CV behavior at various condition

유속을 바꾸며 CO_2 가스를 분사한 경우 풍동 출구와 분사장치에서 0.6m, 1.4m 떨어진

지점에서 측정된 결과를 Table 1, 2, 3과 Fig. 8에 나타내었다. 가스 상태의 CO_2 를 분사한 경우의 측정에서는 유동의 유속과 분사 후 이동 거리가 혼합에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 예상농도가 낮은 경우에 유속이 혼합에 미치는 영향이 크며, 예상농도가 높은 경우는 혼합이 유동의 이동거리에 크게 의존함을 알 수 있다.

3.3 탄산수 분사 및 측정

3.3.1 고정식 혼합기(static mixer)가 없는 경우의 혼합

6m/s 유속의 덕트 유동에 탄산수를 분사한 경우의 가스 조성을 측정하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4. CO_2 concentration distribution of the spray case at 6m/s

distance	concentration	CV
0.6m	0.019%	0.488
1.4m	0.017%	0.417

3.3.2 고정식 혼합기를 설치한 경우

액적과 유동간의 혼합과 증발이 원활히 이루어지도록 평판으로 이루어진 고정식 혼합기를 설치하여 종횡비를 바꿔가면서 측정하였다. 고정식 혼합기는 분무장치 상류에 설치하고 덕트 유속을 4, 6, 8m/s로 한 상태에서 분무장치와 측정장치간 거리를 1.4m로 하여 측정을 실행하였다. 평판 하나하나를 익형(air foil)로 생각하고 개도를 10°, 20°, 30°로 할 때 종횡비 (α)는 각각 0.86, 0.9, 1 이 되고 아래 Table 5는 이 경우의 측정결과이다.

Table 5. CO_2 concentration distribution e.r.t aspect ratio at 6m/s

α	concentration	CV
0.86	0.021%	0.698806
0.9	0.022%	0.713862
1	0.021%	0.805465

혼합기의 개도가 증가해서 종횡비가 커지면 변동계수가 증가한다. 이것은 혼합이 잘 일어나지 않는다는 것이다. 그림 9는 개도를 20°로 맞추고 4, 6, 8m/s로 유속을 바꾸면서 압력 강하를 측정한 결과이고, 그림 10은 6m/s에서 평판 개도와 평판의 폭을 바꾸면서 측정 결과이다.

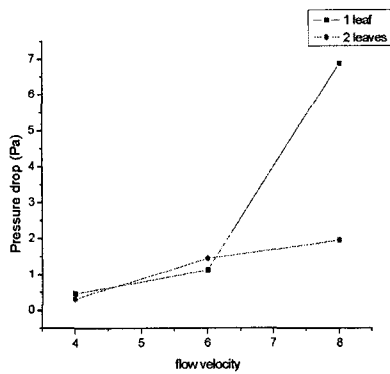


Fig. 9 Pressure drop w.r.t. width of the mixer at 20°

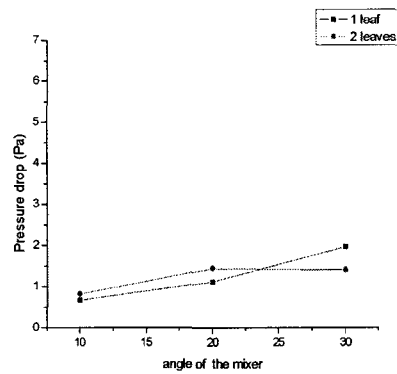


Fig. 10 Pressure drop w.r.t. angle of the mixer at 6m/s

고정식 혼합기의 폭을 늘려서 종횡비를 변화시켜 측정하였다. 2장 씩 같이 움직여서 종횡비가 두배가 되도록 설정하여 측정한 결과를 Table 6와 그림 11에 나타내었다.

Table 6. Case of 2 leaves of the mixer at 6m/s

α	concentration	CV
1.72	0.022	0.739823
1.8	0.021	0.781038
2	0.021	0.830347

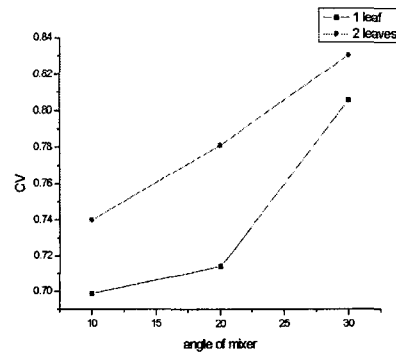


Fig. 11 CV behavior w.r.t. angle of the mixer at 6m/s

혼합기의 각도가 작은 경우 CV가 작게 측정되었다. 혼합기의 각도를 크게 한 경우 나타나는 CV의 증가는 유동에 큰 요동을 준 경우 탄산수에서 발생한 CO_2 와 유동간의 혼합이 잘 이루어지지 않는다고 볼 수 있다. 즉, 혼합기에 의해 단면 유속 분포가 불균일해지는 정도가 커지면 액적의 분포가 편중되기 때문에 CO_2 분포가 불균일해지는 것으로 보여진다.

4. 결론

이 연구를 통해 덕트 유동과 농도를 측정 가능한 가스(tracer), 수용액의 증발에 의한 혼합을 측정하였다. 유동방향으로 진행하면서 혼합이 진행되는 정도를 살펴보고, 수용액의 증발과 혼합을 촉진시키기 위해 작은 평판을 붙인 고정식 혼합기의 종횡비를 바꿔가면서 향상 정도를 측정해보았다.

고정식 혼합기의 개도와 유동을 샘플링하는 위치를 바꾸면서 측정을 실시하였다. 샘플링 위치를 바꾸는 경우는 분사 후 유동과 함께 이동한 거리가 길수록 균일하게 혼합되기 때문에 유동 진행 방향인 출구 쪽으로 갈수록 분포편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 고정식

혼합기의 개도를 바꾸는 경우에는 중횡비가 가장 작은 경우가 변동계수가 가장 작은 것으로 측정되었다. 이것은 액적 분포가 덕트 유동의 유속에 영향을 크게 받기 때문이라고 생각된다.

실험을 수행하는데 있어서 연소 가스 유동에서 분진의 영향을 고려하지 않은 점은 향후 보완 실험 측정을 통해 그 영향을 측정해야 할 것으로 보여진다.

5. 후 기

본 연구는 연소기술 연구센터(CERC)의 지원을 받아 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. John Zink, "The John Zink Combustion Handbook", CRC PRESS, 2001, pp190-192
2. 최상균, "증발 현상을 수반하는 분무 액적의 거동에 관한 수치적 연구", 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1990, pp21-28
3. 한미노즐 매뉴얼, pp44
4. 이상용, "액체의 미립화", 믿음사, 1996, pp109-132
5. Richard D. Cradle, "The measurement of airborne particles", Wiley, New York, 1975, pp319-329