

덕트 유동에서 증발을 수반하는 액상 스프레이의 혼합 특성에 대한 실험적 연구

김영봉* · 최상민**

An experimental study on the mixing of evaporating liquid spray with duct flow

Young-Bong Kim, Sang Min Choi

ABSTRACT

High temperature furnace such as Steam power plant and incinerator contribute considerable part of NOx generation and face urgent demand of De-NOx system. Reducing agents are necessary to use De-NOx system. In this study mixing caused by direct injection of reducing agent solution spray into flue gas duct was measured. Carbonated water was used as tracer and simulated agent because ammonia as a reducing agent is not proper to experiment. Mixing and evaporation must occur simultaneously and quickly enough to achieve desirable efficiency. To achieve that, the angle of attack of static mixer and the location is simulated and CO₂ concentration is measured.

Key Words : spray, mixing, evaporation, CO₂ concentration, static mixer

기 호 설 명

α : aspect ratio (중형비)

AIG Ammonia Injection Grid

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 증대되면서 오염물질에 대한 규제가 심해짐에 따라 고온의 로를 사용하는 시설에서 탈질장치에 대한 관심이 높아지고 있다. 열기관에서 효율을 높이기 위해 고온의 분위기를 유지하려는 노력이 NOx로 대표되는 다양한 질소산화물의 발생을 증가시키는 부작용을 야기하게 된다. 따라서 대부분의 화력발전소나 소각시설에서는 효율이 높은 SCR 설비를 채택하여 사용하고 있다. SCR에는 환원제로 암모니아(NH₃)나 요소(CO(NH₂)₂)를 분사하고 있다. 이

경우 암모니아를 사용하는 시설에서는 보통 20~30%의 액상의 암모니아수로 보관하고 있다가 필요량을 기화시켜서 연소 후처리에 사용한다.¹⁾ 즉, 보관과 연소가스가 흐르는 덕트로 분사시키는 작업을 나누어서 진행하기 때문에 부가적인 설비가 필요하게 된다. 본 연구는 환원제를 가스화 시켜서 주입하는 현행의 system에서 액상의 환원제를 직접 주입하여 SCR 설비를 간단히 제작, 설치할 수 있는 가능성을 살펴보기 위해 수행하였다. 실험 장치는 가스 암모니아를 주입하는 화력발전소의 SCR 설비를 참고하였다. 분사와 혼합이 동시에 이루어지기 때문에 real scale modeling으로 제작을 하여 실험이 가능하도록 하였다. 즉, 환원제의 주입이 일어나는 Ammonia Injection Grid의 일부분을 상사를 유지하면서 측정을 수행할 수 있도록 떼어내어 실험실에서 간단히 측정할 수 있도록 한 것이다.

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

† 연락처, smchoi@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 기계공학과

실제 SCR설비의 적정 운전온도는 최고의 효율을 보이는 3~400℃정도가 되는데 여기에 평균 100 μ m 지름의 암모니아 수용액 spray를 분사하는 경우 spray의 증발에는 큰 무리가 없을 것으로 생각된다. 실제로 유동 중에 분사된 spray의 거동에 지대한 영향을 미치는 요인으로는 기체장의 속도가 있다. 기체장의 온도는 spray의 lifetime을 결정한다.²⁾ 따라서 상온에서 실험을 수행하더라도 기체장의 속도를 맞추면 유사한 spray의 거동을 얻을 수 있을 것이다. 액상 환원제를 직접 분사하여 가스 상태로 분사할 때와 비슷한 효과를 얻을 수 있다면 가스 상태로 분사할 때 필요한 시설을 줄여 처리비용을 절감할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 모델링 방법

2.1.1 실험 장치

다음은 본 연구를 위해 제작된 풍동 모형이다. 풍동은 크게 blower, stabilizer, duct로 구성되어 있으며, 측정 장치로는 Rosemount Analytical 社의 880A 모델을 사용하여 측정을 진행하였다.

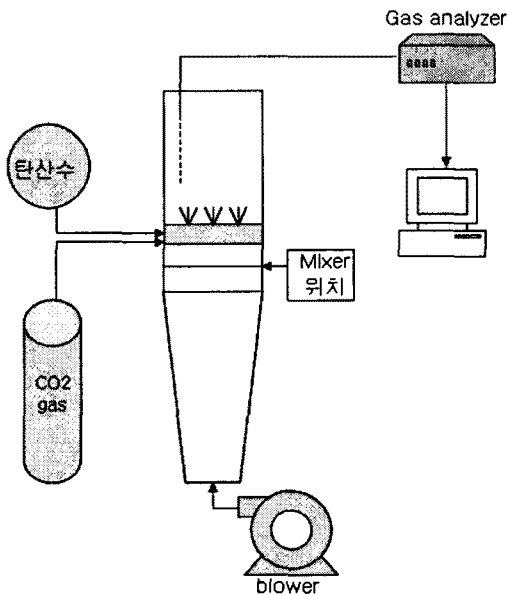


fig. 1 Schematics of experiment system

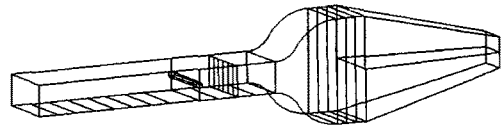


fig. 2 Design of assembled duct and stabilizer

stabilizer는 diffuser - honeycomb, screen - contraction part로 구성되어 있으며, blower에서 발생하는 강한 난류의 유동을 안정화시키는 역할을 수행한다. 실험실의 크기에 맞게 stabilizer의 길이를 줄이기 위해 diffuser에 splitter를 설치하여 separation의 가능성을 줄였다. settling part에서는 screen, honeycomb, screen의 순서로 설치하여 유동의 불균일성을 줄이도록 하였다. contraction part는 유동을 균일하게 만들고, separation을 방지하면서 효과적으로 test section으로 인도하도록 제작되었다.³⁾⁴⁾ 다음은 duct와 stabilizer의 설계도이다.

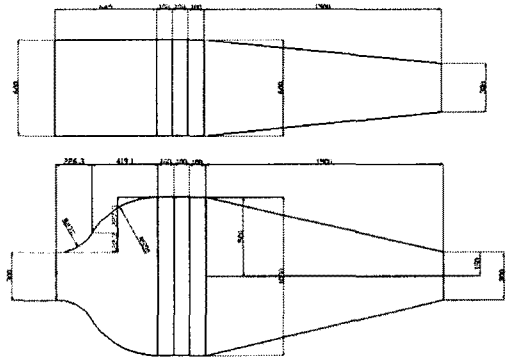


fig. 3 Design of the stabilizer

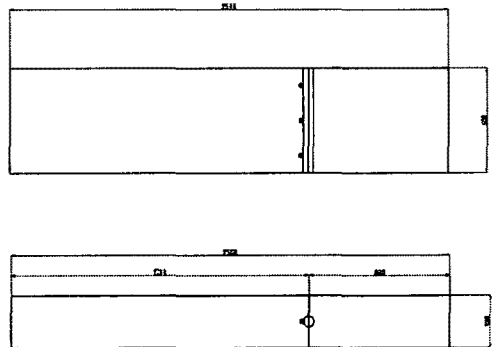


fig. 4 Design of duct

스프레이의 분사와 가스 성분의 측정이 이루어지는 덕트는 30cm×60cm, 길이 2.5m의 아크릴로 제작하였다. 상사성을 유지하기 위해 Re가 10⁵ 이상의 난류는 유사한 거동을 보인다는 사실을 이용해 최소 덕트 유동속도를 4m/s으로 정하고 6, 8m/s로 유속을 조정하며 측정을 실행하였다.

atomizer는 유동방향으로 설치를 하여 충분한 분사각을 확보하기 위해 6개의 분사구가 있는 광각 분사 모델을 사용하였다. fig. 5 와 같이 실제 AIG처럼 덕트를 가로질러 설치한 직경 44mm의 실린더에 3개의 atomizer를 부착하였다.

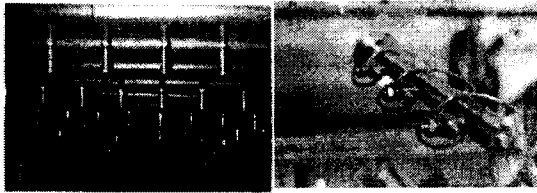


fig. 5 Overview of AIG and atomizer in duct

sampling은 덕트 단면을 16구간으로 나누어 각 구간에서 6초가량 sampling 후 이동하는 방식으로 덕트 출구 근처에서 측정을 하였다. 이렇게 측정된 결과를 각 구간의 유속을 고려하여 농도를 산정하였다. 또한 유동방향에 따른 혼합 진행 정도를 측정하기 위해 atomizer에서 가까운 0.6m 거리에서 측정하였다.

3. 실험 및 측정 data

3.1 가스 상의 CO₂ 분사 및 측정

먼저 가스상태의 CO₂와 유동과의 혼합정도를 측정해보았다. 덕트 내부의 유속을 4, 6, 8m/s로 바꾸면서 일정량의 CO₂ 가스를 주입하여 혼합정도를 측정하였다. 측정은 덕트 단면을 16부분으로 나누어 일정 시간동안 농도를 측정하여 각 부분의 면적속도를 구한 것으로 다시 계산해 낸다. 각각의 유속에서 완전히 혼합되는 경우 0.01%, 0.02%의 농도가 측정되도록 CO₂를 주입하였다. 다음은 측정 결과이다.

| 측정위치 | 예상농도 | 측정농도 | 분포편차 |
|------|-------|--------|---------|
| 0.6m | 0.04% | 0.039% | 0.01124 |
| | 0.05% | 0.053% | 0.02334 |
| 1.4m | 0.04% | 0.039% | 0.00893 |
| | 0.05% | 0.055% | 0.01423 |

table 1 유속이 4m/s일 때의 농도 분포

| 측정위치 | 예상농도 | 측정농도 | 분포편차 |
|------|-------|--------|---------|
| 0.6m | 0.04% | 0.041% | 0.01087 |
| | 0.05% | 0.052% | 0.02095 |
| 1.4m | 0.04% | 0.042% | 0.00886 |
| | 0.05% | 0.049% | 0.01136 |

table 2. 유속이 6m/s일 때의 농도 분포

| 측정위치 | 예상농도 | 측정농도 | 분포편차 |
|------|-------|--------|---------|
| 0.6m | 0.04% | 0.041% | 0.01014 |
| | 0.05% | 0.052% | 0.01983 |
| 1.4m | 0.04% | 0.039% | 0.00619 |
| | 0.05% | 0.049% | 0.0109 |

table 3. 유속이 8m/s인 경우의 농도 분포

가스 상태의 CO₂를 분사한 경우의 측정에서는 유동의 유속과 분사 후 이동 거리가 혼합에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 탄산수 분사 및 측정

3.2.1 static mixer가 없는 경우의 혼합

탄산수를 분사할 때는 droplet의 size를 정하는 것이 중요하다. droplet의 지름이 큰 경우는 유동 중에서 가속과 용질의 기화가 느리게 되어 혼합 효과가 좋게 나오기 어렵다. droplet의 지름이 100 μ m정도 되면 400 $^{\circ}$ C 근방의 덕트로 분사된다면 분사 직후 온도 상승이 급격히 이루어지기 때문에 droplet의 기화에는 비교적 짧은 시간이 소요된다. droplet의 증발에 소요되는 시간은 다음 식으로 구할 수 있다.⁵⁾

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

$$t_{evap} = \frac{\rho_P \lambda d_i^2}{8k_g \Delta T_{LMTD}}$$

고온의 공기에 직경이 100 μ m로 물 spray를 분사한다고 가정하고 이 식을 적용시키면 $t_{evap} = 1.7 \times 10^{-7}$ s의 시간이 소요된다. 즉 입경이 작은 spray의 경우 분사 즉시 가속과 함께 증발이 일어난다. 이 경우 연소가스의 온도변화는 크지 않다. spray의 지름이 1000 μ m인 경우도 증발에는 10⁻⁵s정도로 큰 차이가 없다. 이와 유사하게 탄산수를 분사하는 경우는 대기압과 저장용기에서의

압력차이로 인해 대부분의 CO₂가 분사 즉시 기화가 일어나서 덕트 유동과의 혼합이 일어난다. 실험에는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 탄산수를 구매하여 사용하였다. 탄산수의 CO₂ gas 함량은 정밀하게 측정하기 어렵기 때문에 제조당시 환경을 고려하여 정하였다.

6m/s 유속의 덕트 유동에 탄산수를 분사한 경우의 가스 조성을 측정하였다.

| 측정위치 | 측정농도 | 분포편차 |
|------|--------|---------|
| 0.6m | 0.049% | 0.00919 |
| 1.4m | 0.047% | 0.00815 |

table 4. 탄산수 분사의 경우 농도분포

3.2.2 static mixer를 설치한 경우

spray의 혼합과 증발이 원활히 이루어지도록 평판으로 이루어진 static mixer를 설치하여 중횡비를 바꿔가면서 측정하였다. 실제 현장에서는 static mixer에 의한 압력강하도 중요한 설계인자가 되고, 촉매 층에 진입할 때 유동이 균일한 상태가 되지 않으면 촉매 층의 수명에도 영향을 미치기 때문에 중횡비의 선택 시 신중해야 한다.

static mixer는 지름 14mm의 봉에 46×40mm의 평판 48개를 붙여 유동을 교란시켜 혼합을 촉진시킬 목적으로 유동 중에 설치하였다. fig. 6은 mixer의 모습을 앞, 뒤에서 찍은 것과 설치한 모습이다.

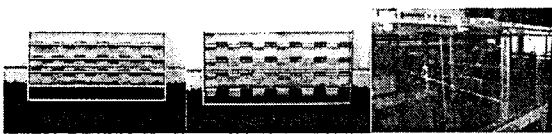


fig. 6 static mixer (front, rear, setup)

다음은 static mixer를 atomizer 상류에 설치하고 덕트 유속은 6m/s로 한 상태에서 atomizer에서 1.4m 하류방향에서 측정을 실행하였으며, 중횡비 α는 0.86, 0.9, 1 로 선택한 경우의 측정결과이다.

| α | 측정농도 | 분포편차 |
|------|--------|---------|
| 0.86 | 0.048% | 0.01033 |
| 0.9 | 0.048% | 0.01083 |
| 1 | 0.051% | 0.01162 |

table 5. static mixer의 개도에 따른 혼합편차

α가 증가할 경우 해당 유속에서의 압력강하가

증가하기 때문에 압력 손실과 혼합 효율간의 상호 trade-off를 고려해야 할 것이다. 실제 압력손실은 측정이 실행된 범위에서는 유속이 작을 경우는 선형적으로 증가하였고, 유속이 큰 경우는 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

3.3 측정 결과 해석

static mixer의 개도와 sampling 위치를 바꾸면서 측정을 실시하였다. sampling 위치를 바꾸는 경우 덕트 유동이 난류이기 때문에 혼합 후 이동 거리가 길수록 균일하게 혼합되기 때문에 분포편차가 줄어드는 것을 알 수 있다. static mixer의 개도를 바꾸는 경우에는 중횡비가 가장 작은 경우가 가장 편차가 작은 것으로 측정되었다.

4. 결론

이 연구를 통해 덕트 유동과 tracer 가스, 수용액의 증발에 의한 혼합을 측정하였다. 수용액의 증발과 혼합을 촉진시키기 위해 작은 평판을 붙인 static mixer의 α를 바꿔가면서 항상 정도를 측정해보았다. 유동방향으로 진행하면서 혼합이 진행되는 정도를 살펴보았다. 혼합정도와 압력손실과의 관계를 좀 더 살펴볼 필요가 있다.

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

참고문헌

- 1) 한덕희, "화력발전소 질소산화물 저감기술", 한라 산업개발 주식회사 vol 4, 2004
- 2) 최상균, "증발 현상을 수반하는 분무 액적의 거도에 관한 수치적 연구", 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1990
- 3) 홍철희, "풍동 수축부의 간결한 최적설계 방법", 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1982
- 4) Pope alan, Rae William H, "Low-speed wind tunnel testing", Wiley, New york, 1984
- 5) 최상민, "소각로 설계개발 방향", 1998