

## 이중 노즐을 갖는 충돌제트기류에서의 혼합특성에 관한 수치해석

김명일, 전원표<sup>1</sup>, 이동현\*  
 성균관대학교 화학공학과, <sup>1</sup>한국에너지기술연구원  
 (dhlee@skku.edu\*)

**Numerical analysis on the mixing characteristics  
 of concentric tube impingement jet**

Myoung Il Kim, Won Pyo Chun<sup>1</sup>, Dong Hyun Lee\*  
 Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University,  
<sup>1</sup>Korea Institute of Energy Research  
 (dhlee@skku.edu\*)

### Introduction

충돌제트기류는 국부적으로 높은 열전달 및 물질전달 속도를 갖는 기술이다. 이러한 장점으로 섬유 또는 필름의 건조, 금속판의 제조공정에서의 가열, 가스터빈의 냉각 등 산업 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 충돌제트기류의 유동 및 열전달 특성, 최적화에 대한 연구는 1970년대부터 현재까지 지속적으로 이루어지고 있다[1-4]. 최근에는 컴퓨터와 수치해석 기법의 발달로 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 이용한 충돌제트기류의 해석도 활발히 이루어지고 있다[5-10]. 이러한 연구들에서 Reynolds number, 노즐과 impingement plate 사이에 거리, 노즐의 지름, 노즐 지름과의 비에 따른 위치 등이 충돌제트기류의 특성을 결정하는 주요한 인자로 고려되었다.

이러한 연구들은 대부분 단일 또는 다중의 슬롯 노즐 및 round 노즐에 대해서 이루어졌다. 다양한 형태와 형상의 round nozzle에 대한 연구가 이루어 졌지만 이중노즐을 갖는 충돌제트기류에 대한 연구는 부족한 실정이다. Concentric tube type의 노즐은 매우 좋은 wall compatibility와 low pressure drop이라는 장점을 가지고 있지만, 나쁜 혼합특성과 throttled에서 불안정한 경향 때문에 제한적으로 사용되고 있다[11]. Concentric tube를 충돌제트기류에 적용하면 충돌 이후에 빠른 혼합이 일어나게 되어 혼합의 위치를 조절할 수 있다는 장점을 가질 수 있을 것이다. 이중노즐 충돌제트기류는 두 가지의 반응물질을 혼합하는 화학공정에서 다양하게 응용될 수 있다. 이와 같이 이중노즐 충돌제트기류를 화학 반응기에 응용할 경우 물질들의 혼합특성이 매우 중요하다. Propylene 고온 염소화 반응을 예로 들면, 이 반응은 반응온도에 따라서 allyl chloride 또는 1,2-dichloropropane으로 주 생성물이 바뀌게 된다. 발열반응으로 위치에 따라 반응기내 온도 분포가 차이가 나는데, 따라서 어떤 위치에서 혼합이 많이 이루어지는가 하는 문제가 중요하다.

본 연구의 목적은 concentric tube를 갖는 충돌제트기류의 혼합특성에 nozzle aspect ratio의 영향을 이해하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 이중노즐에서 같은 유속으로 분사되는 충돌제트기류의 혼합특성을 노즐의 수력학적 지름 0.01 m,  $H/D_i=2\sim 10$ 의 범위에서 살펴 보았다. 유동장을 k-epsilon RNG model로 해석하기 위하여 상용코드인 FLUENT 6.2를 사용하였다.

### Numerical modeling

Fig.1.은 concentric tube impingement jet의 schematic diagram이다. 이중노즐을 통해서 분사되는 제트가 target plate에 충돌한 후 radial 방향으로 배출되는 형태이다. 외부의 영향을 차단하기 위해 confinement plate를 두었다. 노즐 끝에서의 안쪽 노즐의 내경은 0.01 m, 바

갈쪽 노즐의 내경은 0.02m이다. 높이(H)는 안쪽노즐 지름(D<sub>i</sub>)의 2배에서 10배의 범위까지 살펴보았으며, 높이가 변화 하더라도 출구면적은 일정하게 유지되도록 하였다.

분사되는 물질은 모두 상온의 air(density: 1.225 kg/m<sup>3</sup>, 점도: 1.784×10<sup>-5</sup> kg/m-s)로 보았으며, jet exit에서 안쪽노즐(air-1)과 바깥쪽 노즐(air-2)의 속도를 갖게하고, 30~110 m/s의 범위에서 살펴보았다. 따라서 air-1/air-2 유량비는 1/3이며, jet Reynolds number은 20500~75300 의 범위를 갖는다.

본 연구는 아래와 같은 가정하에 진행되었다.

1. 흐름은 2차원 축대칭 형태로 이루어진다.
2. 기체의 밀도와 점도 등 물성이 변하지 않는 비압축성 유동이다.
3. 중력항은 무시하였다.

Fig.2는 본 연구에 사용된 computational domain이다. Mesh는 target plate와 nozzle 주변에 보다 많이 구성했으며, 모두 직사각형으로 H에 따라서 9600~47000개이다. 위에서 서술한 내용을 참고하여, 다음과 같은 지배방정식이 적용되었다.

Continuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \tag{1}$$

Momentum in the axial direction:

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [2(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(\nu + \nu_t) r (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})] \tag{2}$$

Momentum in the radial direction:

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} [(\nu + \nu_t) (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [2(\nu + \nu_t) r \frac{\partial v}{\partial r}] - (\nu + \nu_t) \frac{v}{r^2} \tag{3}$$

Momentum equation에서 난류점도( $\nu_t$ )에 대해서는 k-epsilon Renormalized Group(k-ε RNG) model을 적용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 본 연구 목적의 범위를 벗어나므로 FLUENT User's manual[12]을 참고하기 바란다.

FLUENT에서 momentum equation은 QUICK interpolation scheme을 이용하여 이산화 되었다. 결과의 안정성을 위해 turbulent kinetic energy 와 dissipation equations 항에 second-order upwind scheme 이 사용되었다. 이산화 방정식은 SIMPLEC algorithm을 사용해 계산되었다. 계산은 모든 항목의 잔차가 10<sup>-8</sup>에 도달했을 때, 수렴한 것으로 판단하였다.

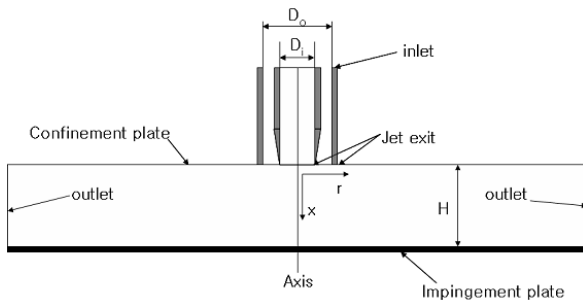


Fig.1. Schematic diagram.



Fig.2. Computational domain (H/D<sub>i</sub>=2, 4).

### Result and discussion

Fig.3.은  $H/D_i = 2$ , jet velocity=50 m/s 일 때, 유동해석 결과를 나타낸 그림이다. Concentric tube에서 같은 유속으로 분사되는 제트기류가 같은 속도로 흐르는 두 유체(air-1 and air-2)가 만나 단일노즐 충돌제트처럼 흐르는 것을 볼 수 있다. Fig.4.은 같은 조건에서 air-1의 mass fraction을 나타낸 그림으로 concentric tube 충돌제트의 혼합특성을 살펴볼 수 있다. 혼합이 발생하는 부분을 free jet region과 wall jet region으로 나뉘어서 살펴볼 수 있다. Free jet region에서는concentric tube의 내부 경계면을 기준으로 혼합이 일어나는 볼 수 있다. 충돌이후 air-1이 air-2 밑으로 파고들어 wall jet region의 초기부분에서 혼합이 빠르게 완성되는 것을 볼 수 있다.

혼합의 정도를 정량적으로 표현하기 위하여 mixing factor( $\eta_{mix}$ )는 equation(4)와 같이 표현되었다[11].

$$\eta_{mix} \equiv 100 \left[ 1 - \left\{ \sum_0^n \frac{M_i(R-\gamma)}{M_i R} + \sum_0^{\bar{n}} \frac{M_i(R-\bar{\gamma})}{M_i(R-1)} \right\} \right] \quad (4)$$

Equation(4)에서  $\eta_{mix}$ 는 국부혼합비가 총 혼합비로부터 이탈된 정도로 정의되어 0~100%의 범위이며,  $\eta_{mix}=100\%$ 는 완전히 혼합되어 있는 상태이고,  $\eta_{mix}=0\%$ 는 혼합이 전혀 일어나지 않은 상태를 의미한다.

Fig.5는 jet velocity 5 m/s에서 radial 방향에 따른 mixing factor의 변화를 보여준다.  $r/D_i=1$  아래는 자유제트영역에 해당하는 부분으로 노즐경계에 해당하는  $r/D_i=0.5$ 인 지점에서  $\eta_{mix}$ 가 극대 값을 갖는 것을 볼 수 있다.  $H/D_i$ 가 커질수록 자유제트영역에서 혼합의 비중이 높아지는 것을 살펴볼 수 있다.  $r/D_i=1$  이상은 wall jet region에서 혼합이 완료되는 부분이다. 이 조건에서  $H/D_i$ 에 관계없이  $r/D_i=5$ 이전에 95%이상,  $r/D_i=6$ 에서 99%이상 혼합이 완료되는 것을 볼 수 있다.

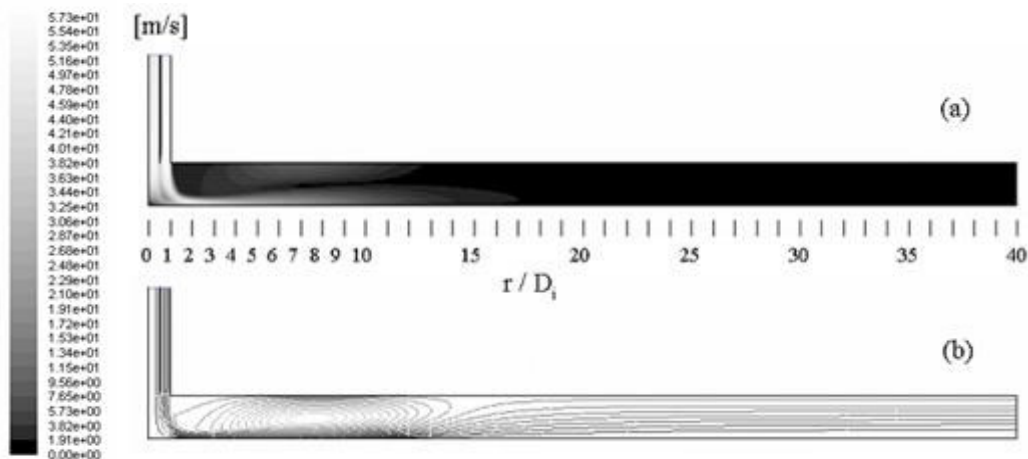


Fig.3. Contour of (a)velocity magnitude and (b)Stream line, ( $H/D_i = 2$ , jet velocity=50 m/s).

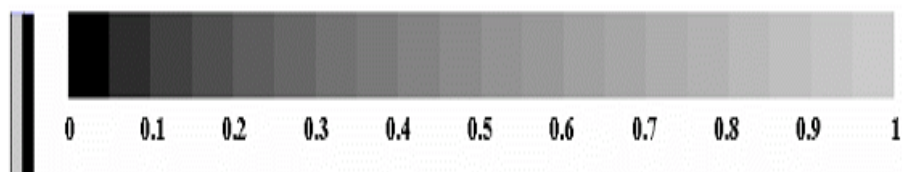


Fig.4. Contour of mass fraction of air-1, ( $H/D_i = 2$ , jet velocity=50 m/s).

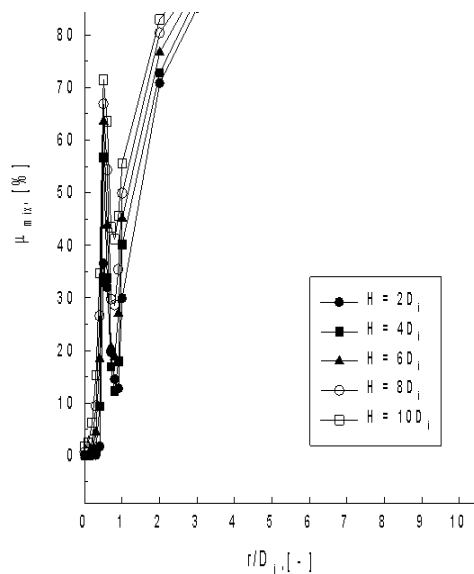


Fig.5. Variation mixing factor( $\eta_{mix}$ ) versus  $r/D_i$ , (jet velocity =50 m/s).

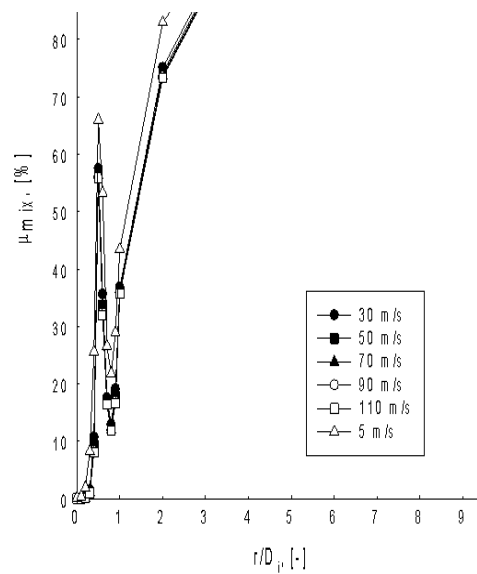


Fig.6. Variation mixing factor( $\eta_{mix}$ ) versus  $r/D_i$ , ( $H/D_i = 4$ ).

Fig.6은  $H/D_i=4$ 에서 jet velocity를 달리했을 때, radial 방향에 따른 mixing factor의 변화를 보여주고 있다. 난류 jet에서(jet velocity>30 m/s) jet velocity에 상관없이 같은  $r/D_i$ 에서 비슷한  $\eta_{mix}$ 를 갖는 것을 볼 수 있다. Jet velocity가 높을수록 큰  $\eta_{mix}$ 를 갖지만 2% 이상의 차이를 보이지는 않는다.

### Conclusions

Concentric tube를 갖는 confined impingement air jet에서 혼합특성에 관한 CFD 연구가 진행되었다. Free jet region에서는 jet가 발달하면서  $r/D_i=0.5$ 를 중심으로 mixing이 발생하는 것을 볼 수 있었으며,  $H/D_i$ 가 클수록 더 많은 mixing이 이 영역에서 발생하였다. Wall jet region에서는 충돌 이후 빠르게 mixing이 완성되어 나가는 것을 볼 수 있었다.  $r/D_i=5$ 에서 95%이상  $r/D_i=6$ 에서 99% 이상의 mixing factor를 나타내었다. Jet velocity는  $H/D_i$ 에 비해 mixing factor에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. J. N. B. Livingood and P. Hrycak, NASA TM X-2778., (1973).
2. S. Ashforth-Frost, K. Jambunathan and C. F. Whitney, Exp. Thermal Fluid Sci., **14**, 60 (1997).
3. F. Sarghini and G. Ruocco, Int. J. Heat Mass Trans., **47**, 1711 (2004).
4. D. W. Zhou. and S. J. Lee, Int. J. Heat Mass Trans., **47**, 2097 (2004).
5. G. K. Morris, S. V. Garimella and R. S. Amano, J. Heat Trans., **118**, 562 (1996).
6. J. A. Fitzrald and S. V. Garimella, Int. J. Heat Mass Trans., **41**, 1025 (1997).
7. G. K. Morris and S. V. Garimella, J. Electronic Packaging, **120**, 68 (1998).
8. M. Angioletti, E. Nino and G. Ruocco, Int. J. Thermal Sci., **44**, 349 (2005).
9. H. Hattori and Y. Nagano, Int. J. Heat Fluid Flow, **25**, 749 (2004).
10. H. Hofmann, H. Martin and M. Kind, Chem. Eng. Technol., **1**, 27 (2004).
11. J. H. Rupe, Appl. Thermal Eng., **25**, 2687 (2005).
12. FLUENT Inc., FLUENT™ 6.0 User's Guide (2001).