

Burner 내 연료와 공기 혼합에 대한 정량적 해석

Quantitative analysis for mixing of fuel and air in burner systems

유영돈*, 정석우
고등기술연구원 전력에너지 연구실

신현동
한국과학기술원 기계공학과

가. 요약

균일한 속도를 갖는 주유동장에 연료를 분사하였을 때 분사된 연료가 주유동장의 공기와 혼합되는 정도를 정량적으로 설명하기 위하여 실험과 수치 계산을 실시하였다. 본 연구에서는 혼합 진전 정도를 나타내기 위하여 혼합진전변수(mixing progress variable)를 도입하여 유동 조건에 따라 혼합 정도를 정량적으로 비교하였다. 주유동 속도가 일정할 때 분사 속도를 증가시키면 연료가 주유동장의 공기와 혼합이 촉진됨을 알 수 있었다.

나. 내용

균일 속도를 갖는 주유동장(cross flow)에 수직으로 분사되는 분류(jet) 유동은 공학적, 환경적인 측면에서 오래 전부터 연구의 대상이었다. 특히 가스 터빈 엔진에서 연소실 내의 화염을 안정화시키거나 연소 가스의 온도를 제어하기 위한 2차 공기가 분사시키는 유동장이나 터빈 블레이드를 고온의 가스로부터 보호하기 위하여 블레이드 냉각에 이용되는 막냉각(film cooling)등에서 이러한 유동 형태를 관찰할 수 있다. 또한 소각로 등에서 오염 물질을 2차 연소시키기 위한 2차 공기 공급 방법에서 1차 소각 후 생성 가스를 효과적으로 2차 공기와 혼합하는데 이러한 유동장의 연구가 진행되어 왔다. 따라서 이러한 유동장의 주된 연구의 대상은 분사된 분류가 균일 유동의 주유동장과 혼합 메커니즘을 이해하는 것이 필수적이다.

지금까지 대부분의 연구는 유동변수(분류 속도, 주유동 속도)에 대해서 분류의 궤적에 대한 correlation을 찾기 위한 연구가 많이 진행되었고^{(1),(2)}, 분류와 주유동의 혼합을 파악하기 위하여 속도장과 온도장에 대한 해석이 진행되었다^{(3),(4),(5)}. 그러나 본 유동장은 근본적으로 3차원 비정상 유동 특성을 갖고 있기 때문에 지금까지의 실험은 유동 특성을 설명하는데 한계를 갖고 있다. 또한 본 유동장을 수치 계산 방법에 의해 해석하는데는 많은 컴퓨터 계산 시간과 용량이 필요하므로 제한적인 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 본 유동장에 대한 실험과 수치 계산을 통하여 혼합되는 정도를 정량적으로 표현할 수 있는 변수를 도입 유동장의 해석을 실시하였다.

실험 장치의 구성은 균일한 공기의 흐름을 만들어 주는 풍동 시스템과 이 공기 유동장에 수직으로 분류를 분사 시켜주는 시스템으로 구성된다. 균일한 속도의 주유동장을 형성하기 위하여 0.4mx0.7m의 시험부(test section) 단면적을 갖는 풍동(wind tunnel)을 제작하였다. 시험부에서의 주유동의 속도 범위는 0.3m/s에서 6m/s까지이다. 주유동 속도가 6m/s일 때의 난류 강도(turbulence level)는 1% 이내였다. 풍동의 밑바닥으로부터 0.1m의 상부에 두께 0.0015m, 폭 0.3m, 그리고 너비 0.7m의 평판을 설치하였고, 이 평판의 선단으로부터 6.5d 인 위치에서 0.009m 의 원형 노즐을 설치하였다.

실험에 사용된 분류는 연료 대신 연료와 분사량이 같은 이산화탄소를 사용하였다. 봄베에서 나온 이산화탄소는 조절기와 완충탱크(surge tank)와 유량 제어용 니들 밸브를 지나 오리피스 통과한다. 이산화탄소의 유량은 오리피스 전후의 압력차를 나타내는 마노미터(manometer)를 설치하여 그 수두를 이용하여 유량으로 환산하였다. Fig.1에 연료와 공기의 공

급 시스템의 개략도를 나타내었다.

본 유동장에서 주유동의 공기와 분류 노즐에서 분사시킨 이산화탄소와의 혼합특성을 이해하기 위하여 이산화탄소의 농도를 가스 크로마토그래프를 사용하여 측정하였다.

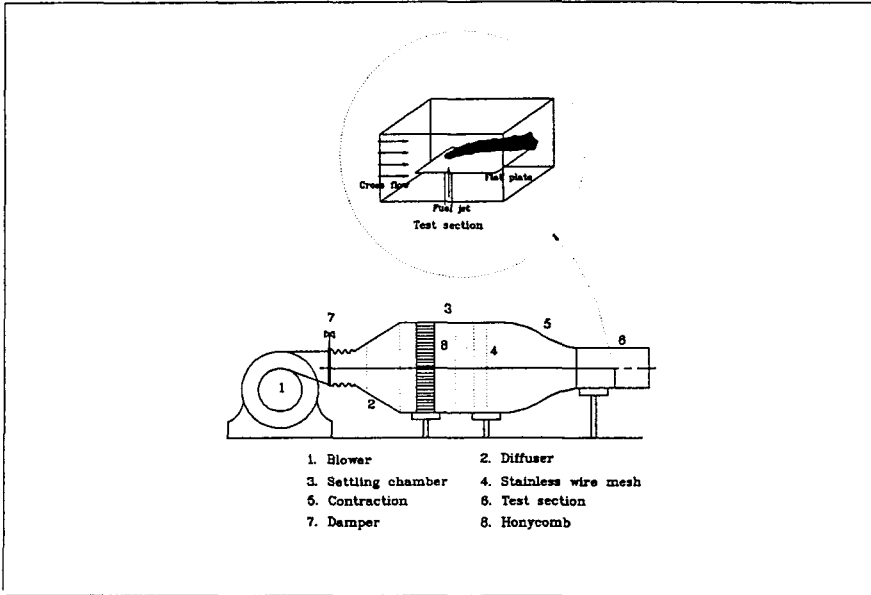


Fig.1 Schematic diagram of flow system

본 연구에서는 유동장 해석(computer simulation)을 위하여 Navier-Stokes식을 지배 방정식으로 채택하였다. 유동장의 혼합 특성을 이해하기 위해서는 속도 정보와 혼합 정보를 얻기 위한 연속방정식, 운동량 방정식, 화학종 보존 방정식 등의 해를 구하여야한다. 위 방정식을 계산하는데 다음과 같은 가정들을 사용하였다.

- (1) 유동은 층류, 정상 상태이다.
- (2) 노즐 중심부를 지나 주유동 방향을 X축, 노즐 분사 방향을 Y축 그리고 이 X-Y면에 수직인 방향을 z축이라 정의하고 Z=0 에 위치한 X-Y 면에 대해 유동이 대칭이다.
- (3) 이상 기체 상태 방정식이 성립된다.
- (4) 확산 속도는 Fick 의 법칙을 따른다.

본 계산에서 이용한 수치적 방법은 3차원 타원형 해법을 이용한 SIMPLER 알고리즘⁽⁶⁾을 이용하였다. 계산에서 채택한 격자계는 비균일 직교 좌표계를 이용하였다. 격자 시스템을 Fig.2에 나타내었다. R은 노즐 반경을 나타내고, r은 노즐 반경 내의 임의의 위치, 그리고 V_j 는 분류의 평균 분사 속도이다. 원형 노즐을 사용하였기 때문에 격자점과 노즐이 일치하지 않는 문제가 있다. 그러므로 본 계산에서는 원관 노즐의 중심에서 원의 공식에 의해 원을 만들고 그 원안에 존재하는 격자점에서는 완전 발달된 원관 내의 속도 분포를 경계조건으로 하였다. 따라서 계산에서는 노즐을 스텝으로 처리하였다. 실제 원관 내의 유동을 완전 발달된 속도 형태로 가정하여 계산한 질량 유량과 계산의 경우 스텝으로 처리하였을 질량유량의 오차는 1%이내였다.

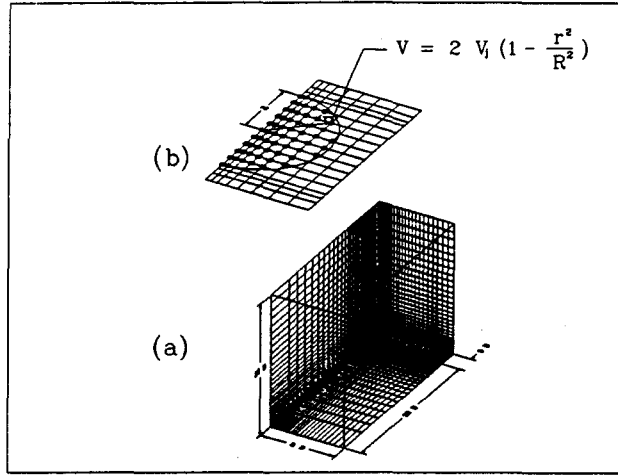


Fig.2 Grid system

다. 결과 및 논의

Fig.3과 4는 주유동 속도는 0.6m/s 로 일정할때 이산화탄소 분류의 분사 속도가 0.6과 1.6m/s 일 때 각 단면에서 측정된 이산화탄소 분류의 질량분율(mass fraction)을 나타낸 것이다.

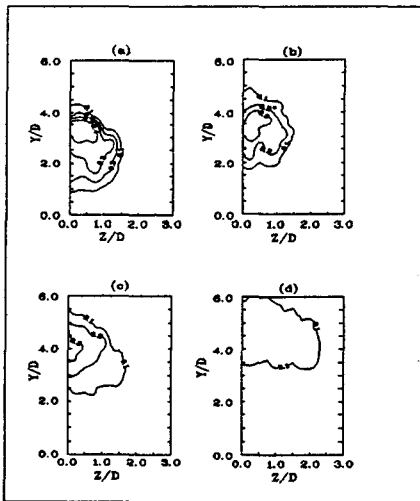


Fig.3 Concentration profiles

$U_i=0.6\text{m/s}$, $V_j=0.6\text{m/s}$

(a) $X/D= 2.17$, (b) $X/D= 4.55$
(c) $X/D= 6.75$, (d) $X/D=11.00$

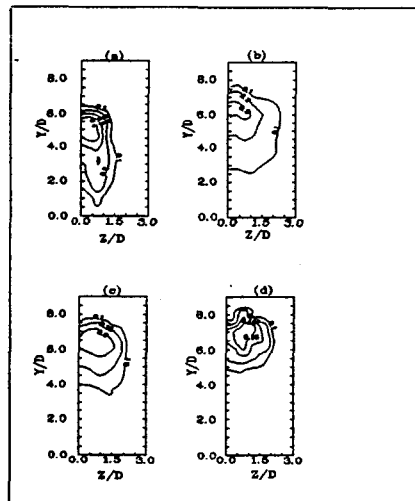


Fig.4 Concentration profiles

$U_i=0.6\text{m/s}$, $V_j=1.6\text{m/s}$

(a) $X/D= 2.17$, (b) $X/D= 4.55$
(c) $X/D= 6.75$, (d) $X/D=11.00$

측정하기 전에 먼저 비연소장의 경우 가시화 사진을 참고로 하여 대략적인 분류 궤적의 위치를 확인한 후 분류 근처에 측정점이 조밀하게 하여 측정하였다. 농도 프르브의 이송은 2개의 2 차원 이송장치를 조합한 3 차원 이송장치를 제작하여 측정하고 측정점은 독취 현미경을 이용하여 위치를 보정하였다. 이때 분류 트레이서의 농도는 이산화탄소를 사용하였다. 그림에서 가장 외곽의 농도값은 0.1 이고 0.1의 간격으로 농도 분포를 나타내었다. 이산화탄소

분류가 분사된 후 노즐 근처 영역에서 최고 농도 값이 대략적으로 0.5 정도로 급격히 감소되고 그 이후에서는 농도의 감소는 매우 완만히 일어남을 알 수 있다. 이 유동장의 일반적인 특성 중의 하나는 하류로 가면서 각 단면에서의 최고 농도의 위치가 유동의 대칭면에 존재하지 않고 임의의 Z 에 위치함을 알 수 있다. 이는 분류의 후면에 존재하는 부착 볼텍스에 의해 기인된다는 것이 여러 연구자에 의해 보고되었다^{(3),(4),(5)}.

Fig.5와 6은 주유동 속도를 0.6 m/s로 일정하게 하고 분류 분사 속도를 변화 시켰을때 0.6 과 1.6 m/s 일때 Y-Z plane 에서의 분류 유체의 등농도를 나타낸 것이다. 여기서 C_{max} 는 지정된 X/D 위치에서 Y-Z Plane에서 농도의 최고값을 나타낸 것이다.

이산화탄소 분류가 하류로 발달되면서 주유동에 의한 압력장과 분류의 후면에 존재하는 부착 볼텍스에 의해 구부러지고, 유동형태는 원래 원형 단면을 콩팥 모양으로 변형을 일으킴을 알 수 있다. 동일한 X 위치에서, 각 단면에서의 최고 농도는 분사 속도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 즉, 최고 농도 값이 분사 속도가 1.6 m/s 일때 가장 낮은 값을 갖는다는 것이다. 이것은 분사 속도가 1.6 m/s 일때가 더 원활한 혼합이 일어남을 정성적으로 의미한다. 그러나 이와같은 농도의 절대값의 비교만으로 정량적으로 혼합의 정도를 설명하기 어렵다. 따라서 본 유동장에서 이산화탄소와 주유동장의 공기의 혼합을 묘사하기 위해서는 혼합기준(mixing criterion)을 도입하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 정량적으로 혼합의 정도(degree of mixing)를 알기 위한 혼합 기준을 도입하였다. Forney⁽⁷⁾, Watanabe⁽⁸⁾ 는 두 파이프 라인에서의 유체의 혼합 정도를 알기 위하여 주 파이프 단면에서의 트레이서 농도의 2 차 모우먼트(the second moment of tracer concentration) 나 그의 표준 편차(standard deviation of the tracer concentration)를 이용하여 혼합 기준을 정의하였다.

본 연구에서는 주유동 방향으로의 표준편차의 변화율을 혼합 정도를 나타내는 변수로 생각하여서, 이를 혼합진전변수(Mixing Progress Variable, MPV) 라고 정의하였다. 트레이서 농도의 2 차 모우먼트, M, 과 그의 표준편차, σ , 는 다음과 같이 정의된다.

$$M \equiv \frac{1}{A_i} \int_i \left[\frac{C}{C} - 1 \right]^2 dA_i = \int_i \left[\frac{C}{C} - 1 \right]^2 P(C) dC$$

$$\sigma = \sqrt{M}$$

\bar{C} 는 주유동 단면에서의 트레이서의 평균 농도를 나타내고, P(C) 는 트레이서 농도의 확률밀도함수(probability density function)를 나타낸다. 다음은 그들이 혼합되기 전의 분류와 주유동에 대한 2 차 모우먼트를 나타낸 것이다.

$$M_o \equiv \frac{1}{A} \int_i \left[\frac{C}{C_{eq}} - 1 \right]^2 dA$$

\bar{C}_{eq} 는 이들 두 유체가 완전히 혼합하여 평형 상태에 도달되었을때의 평균 농도이다. 따라서 혼합진전도는 다음과 같이 정의된다.

$$MPV \equiv - \frac{d}{dX} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)$$

Fig.7에 혼합진전변수의 값을 나타내었다. 심볼로 나타낸 값은 실험으로 측정된 농도 값을 이용하여 계산한 MPV의 값을 나타낸 것이다. MPV 값은 분사 속도의 증가에 따라 함께 증가한다. MPV는 트레이서 농도의 확률밀도함수의 폭이나 표준 편차의 변화율을 나타낸다. 그러므로 MPV 값이 분사 속도가 클때 가장 크다는 사실은 낮은 분사 속도의 경우에 비해 하류로 진행하면서 주위 주유동의 공기와 혼합되는 정도가 더 우수하다는 것이다. 또한 Fig.5와 6에서 본 바와 같이 최고 농도의 값이 같은 후류의 위치에서 분사 속도의 증가에 따라 감소

한다는 결과와도 일치함을 알 수 있다.

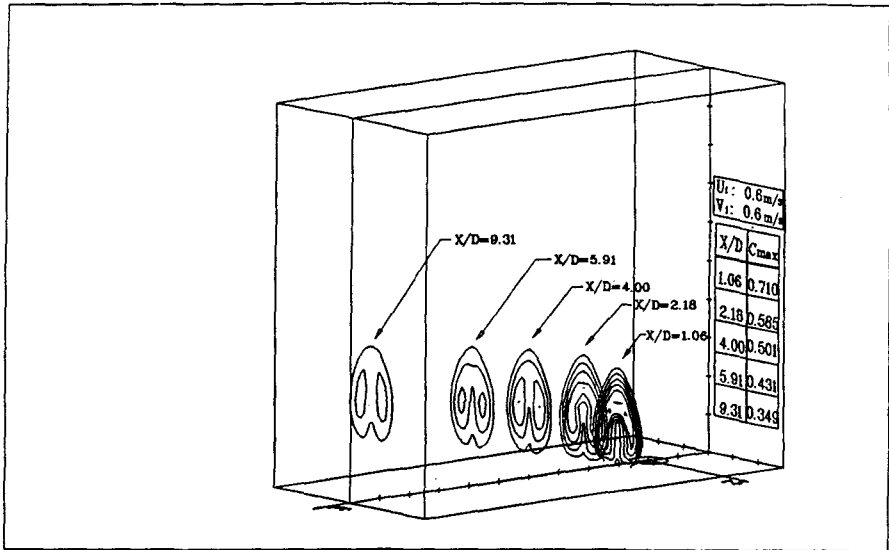


Fig.5 Concentration profiles (Calculation result)
U₁=0.6m/s, V_j=0.6m/s

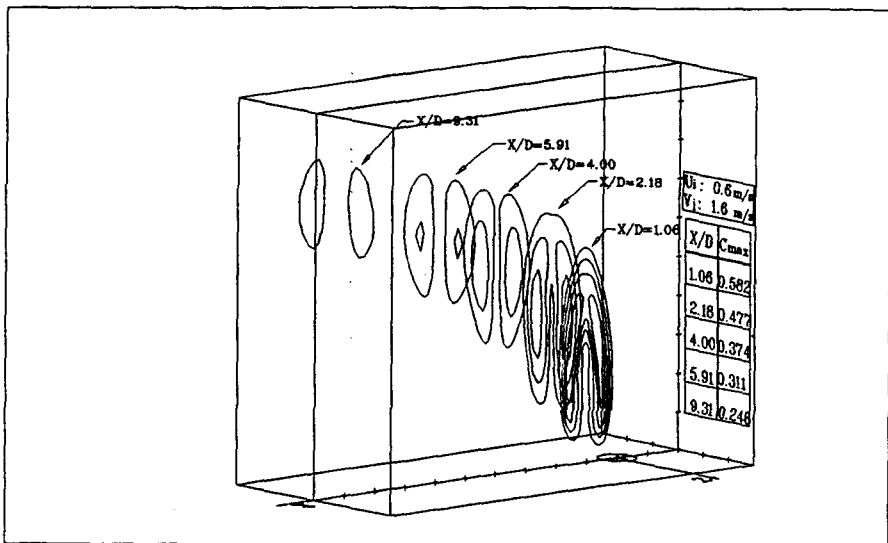
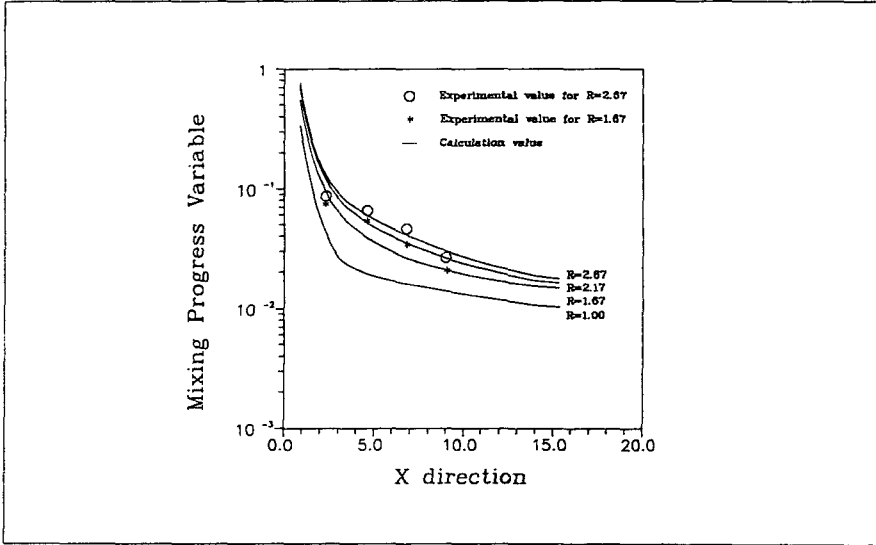


Fig.6 Concentration profiles (Calculation result)
U₁=0.6m/s, V_j=1.6m/s

라. 결론

본 연구에서는 균일 유동장에 수직으로 분사된 유체의 혼합 특성을 이해하기 위하여 실험과 수치계산을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 유동장에서 비연소장에서 분류와 주유동의 공기의 혼합을 정량화 하는데 본 연구에서는 혼합진전변수(Mixing Progress Variable) 정의하였으며 이 값으로 혼합 진행도를 평가하였다. 본 실험의 유동 범위에서는 분류 분사 속도가 증가함에 따라 혼합이 더 활발하게 됨을 알 수 있었다.



$R=1.00(U_i=0.6\text{m/s}, V_j=0.6\text{m/s}), R=1.00(U_i=0.6\text{m/s}, V_j=1.0\text{m/s})$
 $R=2.17(U_i=0.6\text{m/s}, V_j=1.3\text{m/s}), R=2.67(U_i=0.6\text{m/s}, V_j=1.6\text{m/s})$

Fig.7 Mixing progress variable for the injection velocities.

마. 참고 문헌

1. A. Vranos and D.S. Lincinsky, Planar imaging of jet mixing on crossflow, AIAA J., 10, pp. 1425-1429(1972).
2. V. Kuppu, T.A. Brzustowski, Tracer studies of jets and diffusion flames in cross-flow, Combust. Sci. and Tech. 27, pp. 229-239(1982).
3. Z.M. Moussa, J.W. Trischka, and S. Eskinazi, The near field in the mixing of a round jet with a cross-stream, J. Fluid Mech., 80, pp.49-80(1977).
4. J. Andreopoulos and W. Rodi, Experimental investigation of jets in a cross flow, J. Fluid Mech., 138, pp. 93-127(1984).
5. J. Andreopoulos, On the structure of jets in a crossflow, J. Fluid Mech., 157, pp.163-197(1985).
6. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGRAW-HILL, pp. 133-134(1980).
7. L.J. Forney, Jet Injection for Optimum Pipeline Mixing, Encyclopedia of Fluid Mechanics, pp. 660-690(1986).
8. T. Maruyama, and F. Watanabe, Turbulent Mixing of Two Fluid Streams at an Oblique Branch, International Chemical Engineering, 22, pp. 287-294(1982).