

〈논 문〉

분지관 혼합기의 난류 혼합에 대한 유동 가시화 연구 (I)

김경천* · 신대식** · 이부환**

(1996년 12월 11일 접수)

Flow Visualization Study on the Turbulent Mixing of Two Fluid Streams (I)

Kyung Chun Kim, Dae Sig Shin and Bu Hwan Lee

Key Words : Flow Visualization(유동가시화), Optimal Mixing(최적 혼합), Diameter Ratio(분지관과 주관의 직경비), Branch Pipe Angle(분지각), Methane Concentration Profile(메탄 농도 분포)

Abstract

An experimental study has been carried out to obtain optimal conditions for turbulent mixing of two fluid streams at various angle branches by a flow visualization method. The main purpose of this study is the utilization of flow visualization method as a fast and efficient way to find the optimal mixing conditions when several flow control parameters are superimposed. It is verified that the optimal conditions estimated by flow visualization method have good agreement with the concentration field measurements. The results demonstrate that the diameter ratio is mainly attributed to the mixing phenomena than the branch pipe angle and the Reynolds number. The most striking fact is that there exists the best diameter ratio, $d/D \cong 0.17$, which requires the minimum momentum ratio in the range of the present experiment. The velocity ratio for the optimal mixing condition has a value within 2 to 16 according to the different flow parameters.

기 호 설 명

C : 제트 추적 농도
 C_{max} : 최대 제트 추적 농도
 d : 제트 입구 직경 [mm]
 D : 파이프 직경 [mm]
 R : 속도비 $[U_j/U_p]$
 R_m : 운동량비 $[\rho_j A_j U_j^2 / \rho_p A_p U_p^2]$
 Re_p : 파이프 레이놀즈 수
 Re_j : 제트 레이놀즈 수
 U_j : 평균 제트 속도 [m/sec]
 U_p : 평균 파이프 속도 [m/sec]

그리스문자

α : 제트 분사각

하첨자

p : 파이프
 j : 제트

1. 서 론

유체와 유체의 혼합으로 생기는 난류현상은 공학적으로 빈번히 등장하는 기본 현상이다. 두 개의 관을 이용한 두 유체의 난류혼합은 화학공정의 튜브형 장치나 배기가스 냉각, 하수배출 등에서 널리 이용되며, 유체 성분의 회석 및 상호반응, 열전달 등의 이유로 혼합은 합류점에서부터 유동방향으로

*회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

**회원, 부산대학교 대학원

가능한 짧은 거리에서 이루어질 필요가 있다. 특히 환경 문제 등에 있어서도 유체의 혼합에 의한 난류 현상의 규명은 중요한 문제이다. 근래에는 전체 혼합공정에서 빠른 혼합의 중요성을 강조하고 있으며, 또한 높은 효율성을 가지면서 균일한 혼합을 위해서 수력펌프, 기계적인 혼합탱크 등을 포함하여 많은 장치들이 사용되어져 오고 있다. 그 중에서 기계적인 혼합탱크는 역 혼합 반응기라고 불리며 가장 인기가 있었지만 이 장치는 유동의 주기성과 유체의 질량회전 때문에 균일한 혼합을 이루지 못하며 흡입과정에서 손실이 따르게 된다. 따라서 유체의 일부분은 화학적인 높은 농도를 가지고 있고, 어떤 부분은 낮은 농도를 가지게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위해 최근 분지관 혼합기로 대체 되어지고 있고, 분지관 혼합기가 빠른 혼합장치로서 효율이 높다는 것을 알게 되어 가장 실질적인 장치로서 널리 사용되고 있으며, 제작경비 및 운영비가 저렴하고 과도한 수두손실이 발생하지 않는 이점을 가지고 있다. 분지관 혼합기에서 분사제트는 측면이나 중앙에 위치하여 주관 유동에 분사되어진다. 따라서 공학자들에게 분지관에서 주관으로 제트가 분사될 때 발생하는 난류 혼합과정에 큰 관심을 가지고 있다.

분지관의 혼합은 Chilton과 Genereaux⁽¹⁾에 의해 연구가 시작되었는데, 주입되는 유체는 유동 가시화를 위하여 스모크를 사용하였다. 주입되는 유체의 유동 속도가 주관유동 속도의 2~3배가 될 때 가장 짧은 거리에서 만족할 만한 혼합이 이루어지며, 혼합이 완료되는 유동 방향의 하류 거리는 주관직경의 2~3배가 된다고 주장하였다.

Ger.⁽²⁾는 농도 추적법을 사용하여 T자형 분지관 혼합과 다른 형태의 파이프라인 혼합상태를 비교하였는데, 주관 중심 또는 벽 근처의 위치에 주관과 평행하게 제트를 분사시키는 혼합형태보다 T자형 분지관의 혼합형태가 최적 속도비에서 최적 혼합거리가 더 짧다는 것을 관찰하였다. 또한 분지관의 지름이 주관 지름보다 적을 때 최적의 혼합이 되는 분지관과 주관의 속도비는 12가 된다고 하였다.

일반적으로 두 유체 흐름의 혼합에 대한 지배인자로서는 주관과 분지관의 직경비, 주관 유동과 분지관 유동의 Reynolds 수, 분지관 유동이 주관에 분사가 되는 주입구로부터 유동의 하류 방향거리, 분사되는 제트의 주입각도 변화 등이다. 이와 같은 유동장의 혼합에 대한 최적조건을 만족시키기 위해

서는 실험을 통해 각종 영향인자들의 효과에 대하여 유동장의 특성 분석이 이루어져야 한다.

실험적인 연구에 사용된 중요한 가정은 최적 혼합에 대한 판정 기준이다. 일반적으로 최적혼합 판정은 주입된 제트가 분사점에서 하류방향 2~10D 사이의 위치에서 제트의 중심 축이 주관 축과 기하학적으로 일치되는 경우가 최적혼합이라고 가정해 오고 있다. 이것은 Chilton과 Genereaux⁽¹⁾의 개척적인 연구에서도 언급되었고, Forney와 Kwon⁽³⁾도 $0.025 \leq d/D \leq 0.2$ 인 조건에서 주입된 제트의 중심 축과 주관 축이 일치하는 것이 최적 회색조건이라고 발표하였다. Maruyama⁽⁴⁾ 등은 경사진 분지관에서 두 유체의 최적 혼합에 대한 조건식을 주관의 수직단면 온도구배의 표준편차를 측정하여 분지관 주입각의 함수로써 나타내었다. 그밖에 하천의 오염원 확산에 대한 연구로 Hodgson과 Rajaratnam⁽⁵⁾에 의해서 채널 유동의 바닥으로부터 유출되는 원형제트에 대한 연구가 수행되었으며 최근에는 C. Brucker⁽⁶⁾가 분지관 근접지역에서의 난류구조를 파악하기 위하여 PIV (Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 근접영역에서의 속도분포를 측정하여 여러 가지 난류구조의 형성에 대하여 연구하였다.

최근 유동가시화 연구는 난류구조의 형태 및 거동에 관하여 정성적인 정보뿐 아니라 정량적인 데이터를 구하기 위한 효과적인 연구 방법으로 채택되어지고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 유동가시화를 통하여 다수의 유동지배인자가 존재하고 있는 분지관의 최적 혼합 판정을 시도하고자 한다. 본 연구에서는 2차원 평면의 유동가시화 결과라는 한계로 인하여 3차원적인 분지관 혼합에 관련된 모든 조건을 완전하게 고려한다고 볼 수는 없지만, 최소한 공학적 설계에 필요한 최적의 혼합조건에 영향을 주는 여러 가지 인자의 영향을 실험에 의해 체계적으로 규명하는데 목적이 있다.

2. 분지관 유동의 특성

분지관 혼합기의 혼합과정에 있어서 주관의 흐름에 유입된 분지관의 유동은 주관흐름의 수 배정도의 속도를 가진 유동으로서, 분지관 제트유동을 주관에 분사하면 주관의 유동에서 유체 일부가 유입(entrainment) 되어지고, 주관에 분사된 제트의 외곽 경계층에서는 주위유동에서 유입된 유체로 인

하여 제트 운동량의 일부를 잃어버리기 때문에 제트의 중심 영역보다 제트의 외곽 경계층에서 유동이 쉽게 변형이 되고, 제트의 단면형상은 신장 모양과 비슷한 형태를 지니게 된다. 이러한 주위유동의 유입은 제트의 휘어짐을 더욱 가속화시키고, 주관유동의 흐름방향으로 진행하면서 제트유동과 주위유동이 미소한 각 차이로 흐르게 되고, 이 때 제트 단면의 대부분에서 와류 쌍이 발생하게 된다. 이러한 와류 쌍은 주위유동의 유입과 순환을 증진시키는 역할을 한다. 이러한 변형된 제트의 와류구조에 의해서 주위유동은 또 다른 와류 시스템을 생성하면서 복잡한 교류유동을 일으키게 된다.

주관의 유동이 분지관 제트의 경계를 만나면 주관의 유속은 유동이 강제로 된 실린더를 만나는 것과 같이 감속하게 된다. 분사제트와 강제 실린더와 다른 점은 제트의 경계가 유연하기 때문에 주위 유동을 유입한다는 것이다. 분사하는 제트의 속도비가 너무 작으면 주관유동과 충분한 혼합이 이루어지지 않고, 주관벽의 아래부분에만 제트가 머물게 된다. 또한 속도비가 너무 크면 제트는 주관유동에 과다 유입되어 주관벽의 윗부분에 부딪히게 되며 이 또한 제트가 주관벽의 윗면에 과다 투입되는 결과로 혼합상태가 고르지 못하게 된다. 최적 혼합상태는 분사하는 제트의 중심선과 주관의 중심축이 기하학적으로 일치하는 것으로 이때의 조건을 주관과 분지관의 최적속도비라고 정의한다.

분지관으로부터 주위동 방향으로 어떤 일정한 고정거리에 제트가 중심에 있다고 가정하고, 부력효과를 무시한다면 최적속도비는 다음과 같이 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$R = f(d/D, Re_p, Re_s, \alpha) \quad (1)$$

여기서 $R = U_j/U_p$ 은 제트 유동속도와 주관 유동속도에 대한 비이다. α 는 주관과 분지관이 이루는 각도이다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치를 Fig.1에 간략하게 나타내었다. 주관은 아크릴로 만들어져 있고, 주관 내경이 100 mm이다. 주관을 통한 1차 공기 유동은 분사점으로부터 19D 하류에 위치한 송풍기에 의해 흡입된다. 송풍기에 의한 비틀림 유동을 방지하기 위해 주관과 송풍기 사이에 하니콤과 그물망을 설치하였다. 주관 입구와 분사점 사이의 전체 길이는 주관 직경(D)의 70배로 주관 유동이 분지관 주입구에서 충분히 발달된 유동이 되도록 하였다. 분지관을 통한 2차 스모크 유동 역시 완전 발달된 유동을 얻기 위하여 분지관 길이를 분지관 직경의 60배로 하여 사용하였다. 주관의 공기속도는 송풍기의 회전수를 변화시키면서 속도를 조절하였다. 각 입구 단면적에 흐르는 주관유동 속도는 피토티관을 설치하여 디지털 마노미터에 의해서 측정하였다.

본 연구에 사용한 주관 유동속도는 1.58 m/s ~ 6.32 m/s 범위이고, 이것은 주관 Reynolds 수 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 에 해당된다. 분지관 속도는 2.37 m/s ~ 101.12 m/s이고 이때의 분지관 Reynolds 수 $3.75 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^5$ 이며, 2~10D의 하류방향 거리에 대하여 실험이 수행되었다. 최적 혼합조건을 결정하기 위한 분지관의 분사는 분지관과 주관의 직

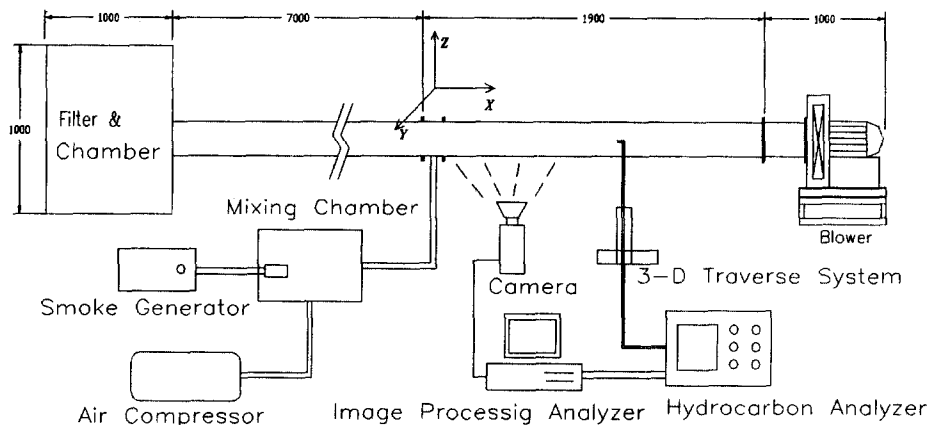


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

경비와 분사각도에 의해서 결정되었다. 분지관과 주관의 직경비는 0.1~0.25를 사용하였고, 분지관의 분사각도는 30°, 45°, 60°, 90° 4가지 경우를 사용하였다. 분사각도(α)에 대한 정의는 Fig. 2에 나타나 있다.

유동가시화를 위한 스모크는 10 μm 정도의 직경을 갖는 에틸렌 글리콜 분무와 공기의 혼합기로서 주관의 1차 공기와의 밀도차는 무시될 정도이다. 스모크 발생기의 맥동을 막기 위하여 저장탱크를 만들어 내부에 스모크 발생기를 장착하고 공기압축기와 연결하여 유동가시화를 위한 스모크가 분사되도록 하였다. 공기 압축기를 가동하면 저장탱크 내부에 있는 스모크가 분지관을 통하여 주관에 주입되고 분지관의 속도는 유량계를 이용하여 압력조절 밸브로 조절하였다.

가시화 화상은 1/10000 초까지 촬영이 가능한 CCD 카메라(Sony, CCD-V5000)로 촬영이 되고 화상처리 보드(Samsung, FARA MVB-02)가 장착된 컴퓨터에서 분석하였다. 스모크 분지관의 중심을 지나는 x-z 평면의 조명을 위해 4 W 출력의 아르곤 레이저 광원과 원통렌즈를 이용하여 1 mm 두께의 평면광(sheet beam)을 만들었다. 본 연구에서 최적 혼합의 판정은 주관에 분사되는 원형 스모크 제트 중심 축이 분사점으로부터 하류방향으로 2D인 거리에서 주관 중심 축에 따라 기하학적으로 일치가 될 때 최적이라고 판정하였다. 만약 가시화 장치에 나타난 스모크의 분포가 주관 중심 축에 대해 비대칭이면 분지관 속도를 적절히 조절하였다. 즉 주관의 중심 축 아래에 스모크 중심 축이 분포되면 분지관 속도를 증가시켰고, 주관 중심 축 위에 스모크 중심 축이 있으면 분지관 속도를 감소시

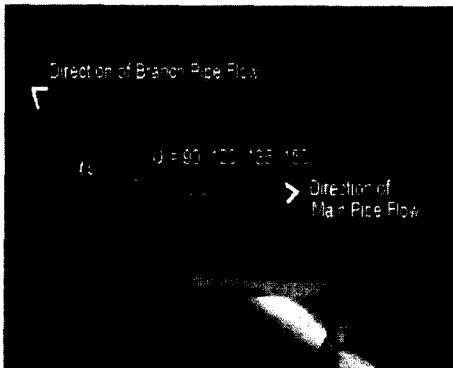


Fig. 2 Combination of main pipe and branch pipe.

켰다. 주관 중심 축에 대하여 대칭적인 스모크 분포가 얻어질 때까지 이런 방식으로 조절하였다. 최적혼합 위치의 조건이 얻어졌다고 판단되면 그때의 주관과 분지관 속도, 온도, 압력, 분지관과 주관의 직경비, 분사각을 기록하였다.

가시화 방법에 대한 검증으로 농도 추적법을 사용하였다. 분지관에서 주입된 스모크의 중심 축이 주관 중심 축과 일치된 최적 혼합조건과 동일하게 분지관에서 메탄을 분사시켜 분사점으로부터 하류방향으로 $X/D=2, 5, 10$ 위치에서 메탄 농도 분포를 3축 이송장치를 사용하여 주관 수직 축에 따라 측정하였다. 메탄농도는 Hydrocarbon 분석기(Eurotron Greenline MK 2)에 의해 측정하였고, 분지관으로는 0.3% 농도의 메탄 공기 혼합기가 주입되었고 주입속도는 유량계를 이용하여 압력조절 밸브로 조절하였다. 농도 측정센서의 직경은 5 mm 이며, 메탄농도 분포는 주관 수직 축에 따라 10 mm 간격으로 측정하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 가시화 현상과 농도 분포의 비교

Fig. 3은 최적 혼합인 경우의 순간적인 농도분포에 대한 전형적인 가시화 화상을 나타낸 것이고, Fig. 4, Fig. 5에는 두 가지 종류의 최적혼합이 아닌 경우에 대한 가시화 화상을 각각 나타내고 있

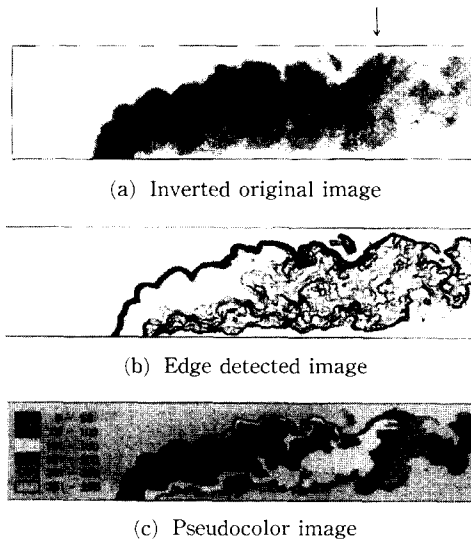


Fig. 3 Smoke visualization of optimal mixing condition ($R=2.68$, $Re_p=1 \times 10^4$, $d/D=0.20$, $\alpha=90^\circ$).

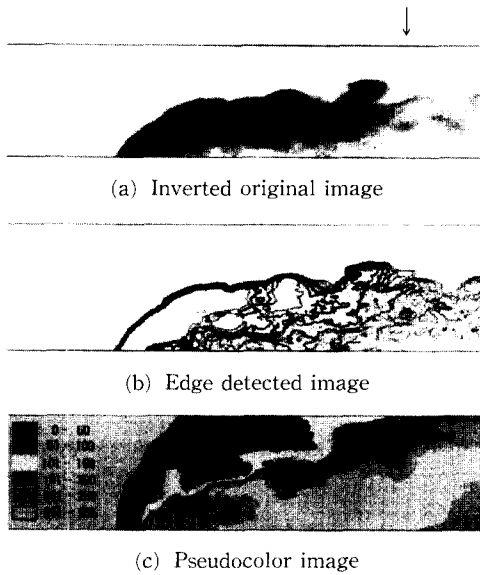


Fig. 4 Smoke visualization of poor mixing for the case of underpenetration ($R=1.5$, $Re_p=1 \times 10^4$, $d/D=0.20$, $\alpha=90^\circ$).

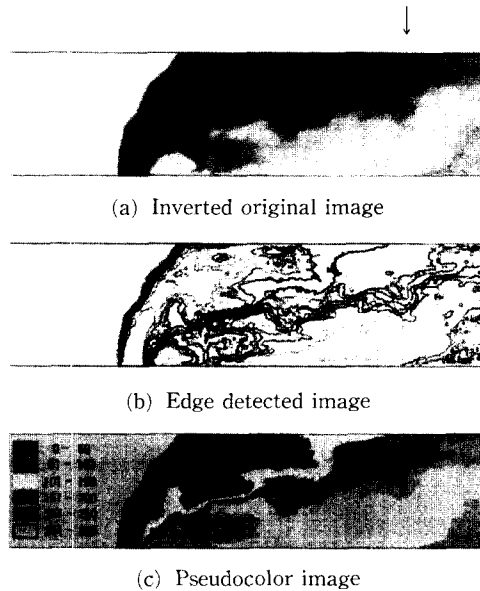


Fig. 5 Smoke visualization of poor mixing for the case of overpenetration ($R=3.5$, $Re_p=1 \times 10^4$, $d/D=0.20$, $\alpha=90^\circ$).

다. 관찰지점인 $X=2D$ 를 가시화 화상 윗면에 화살표로 표시하였다. Edge를 추출한 화상과 pseudocolor 화상이 또한 Fig. 3~Fig. 5에 나타나 있다. Pseudocolor 화상에서 수치는 Grayscale이

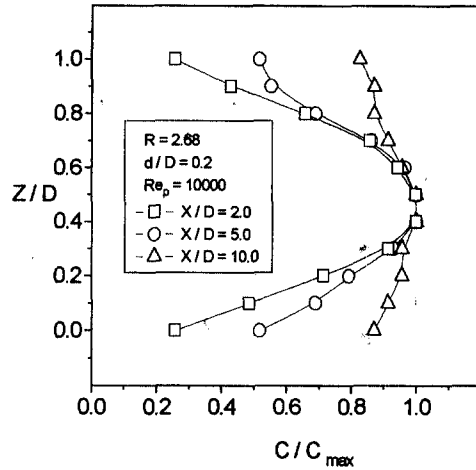


Fig. 6 Methane concentration profiles for the case of optimal mixing.

며, 가시화로 획득한 화상을 Grayscale로 변환하여 6단계로 나누어서 나타난 화상이다. Fig. 4는 주관유동과 분지관 제트유동의 속도비가 작은 경우를 유동가시화한 것으로서 대부분의 Grayscale이 주관의 중심 축보다 아래에 존재하여 주관의 아래 부분에 제트가 머무르고 있음을 보여준다. Fig. 5는 이와 반대로 속도비가 큰 경우로 제트가 과다 유입되어 주관벽의 윗부분과 제트가 부딪히게 되고, 대부분의 Grayscale 분포가 주관의 중심 축 윗부분에 머무르게 된다. Fig. 3에 나타난 최적혼합 조건의 경우 Grayscale의 분포를 보면 관찰 지점 $X=2D$ 에서 주관 중심 축에 대하여 대칭적으로 나타나고 있다. 최적혼합의 판정을 위해 20장 이상의 순간화상을 평균하여 대칭성의 균일도를 정량적으로 조사하였다. Z축에 따라 Grayscale의 앙상블 평균(ensemble average)을 취하여 대칭 분포도가 중심으로부터 면적 적분치의 편차가 $\pm 5\%$ 이내가 되면 최적혼합이라고 결정하였다. 가시화 화상에 대한 영상처리 결과로부터 분지관 혼합 유동에 대한 순간적인 난류 eddy 형태를 알 수 있으며, large scale eddy가 scalar 혼합에서 지배적인 역할을 한다는 것을 분명히 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 3과 같은 최적 혼합조건에서 메탄을 분사했을 때의 농도 분포를 나타낸 것이다. 제트의 메탄 농도 분포는 분사점 중심으로부터 유동 가시화 관찰지점인 하류 거리 $2D$, $5D$, $10D$ 에서 주관의 수직 축에 대하여 취득하였다. 가시화 화상으로 결정한 최적 혼합조건에서 메탄 농도 분포가

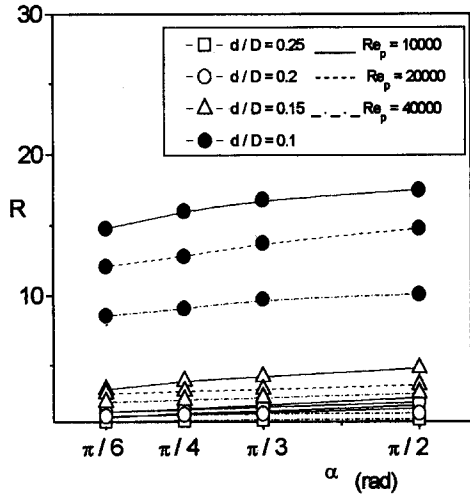


Fig. 7 Optimal velocity ratio, R as a function of injection angle, α .

주관 중심 축에 대하여 대칭적으로 나타난다. 이러한 결과로부터 가시화 현상으로 판단한 최적 혼합 관정이 효과적이며 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 최적 혼합조건 관찰지점인 $X=2D$ 의 대칭적인 매탄 농도 분포가 $5D$, $10D$ 의 하류 지점에서도 주관 중심 축에 대하여 대칭적으로 유지된다. 또한 $X=10D$ 위치에서는 농도의 확산이 주관의 전 영역에 걸쳐 이루어졌고, 벽면의 농도가 중심축의 최대농도에 비해 85%까지 이르렀음을 알 수 있다. 참고로 유동가시화 기법으로 최적혼합조건에서의 속도비를 찾는데 걸리는 시간은 본 실험의 경우 주관의 속도와 분지관의 각도가 주어졌을 때 농도추적 기법의 경우에 비해서 거의 $1/100 \sim 1/200$ 정도밖에 걸리지 않으므로 매우 효과적이다.

4.2 분지각도에 대한 영향

분지관 각도의 영향을 알아보기 위하여 분지각도 (α) $\alpha=30^\circ$, 45° , 60° , 90° 에 대하여 분지관과 주관의 직경비가 $0.1 \sim 0.25$, 주관 Reynolds 수 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 대하여 실험을 수행하였다. 분지각도는 주관 축으로부터 분지관의 중심까지 이루는 시계방향의 각도로 정의된다. 그러므로 90° 는 수직관을 의미하고 30° 는 평행 관으로부터 상류방향으로 30° 각도를 이루게 된다. 분사점 중심에서 하류방향 거리 $X/D=2$ 에서 여러 가지 유동조건에 대한 최적속도비를 구하여 분지각도의 영향을 비교하였다.

Fig. 7은 여러 가지 주관 Reynolds 수와 직경비

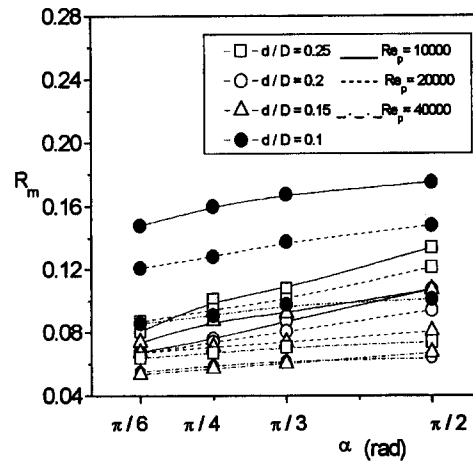


Fig. 8 Optimal momentum ratio, R_m as a function of injection angle, α .

에서 최적속도비에 대한 분지각도의 효과를 나타낸 것이다. 최적속도비는 여러 가지 유동 조건에서 2에서 16사이의 범위를 가지고 있으며, 이전의 연구자들^(1,2)에 의해 얻어진 최적속도비는 현재 연구의 결과 내에 포함된다.

최적속도비는 분사각도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. α 가 90° 인 경우에 비해 α 가 30° 인 경우는 속도비가 대략 25% 정도 감소하고 있다. 분지관에서 제트가 주유동에 분사될 때 분지각도가 작은 제트는 강력한 운동량 교환으로 인한 swift back효과로 혼합에 대해 유리한 점을 가지고 있다. 이것이 분지각도가 감소함에 따라서 최적속도비가 감소하는 이유중 하나이다. 최적속도비에 대한 분지각도의 효과는 직경비가 작은 경우에 뚜렷이 나타나지만 큰 직경비에서 무시될 수 있을 정도로 작으며 또한 주관 Reynolds 수가 작은 경우에 최적속도비가 민감하게 변화한다는 사실을 알 수 있다. 이는 혼합의 메커니즘이 속도비 보다는 운동량의 비율에 더욱 의존적이라는 사실을 말해준다.

Fig. 8에는 최적혼합조건에서의 운동량비가 분지각도 α 의 함수로 나와있다. 본 실험의 측정범위에서 최적운동량비는 $0.05 \sim 0.18$ 의 범위를 보이고 있다. α 가 작아질수록 최적운동량비가 작아지는 추세이나 최적속도비의 경우처럼 직경비에 따라 최적운동량비가 일률적으로 변하고 있지 않다.

4.3 분지관과 주관의 직경비에 대한 혼합효과

분지관의 직경비 $d/D=0.10, 0.15, 0.20, 0.25$ 에 대해서 분지각도를 $30^\circ \sim 90^\circ$ 로 변화시키고, 주관 Reynolds 수 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 인 경우에 대하여 $x/D=2D$ 인 지점에서 얻어진 최적속도비(R)의 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 직경비가 $0.1 \sim 0.15$ 인 경우 최적속도비는 급격하게 변화하고 있고, 직경비가 0.15 이상이 되면 최적속도비(R)는 거의 일정한 값을 가지게 된다. 이것은 분지관 노즐 출구면적이 작아지면 분사되는 제트의 운동량이 바뀔 때 속도가 민감하게 변화하기 때문이다. Fig. 9는 직경비가 변화할 때 주관 Reynolds 수와 분지각도도 다소간 최적속도비에 영향을 미친다는 것을 보

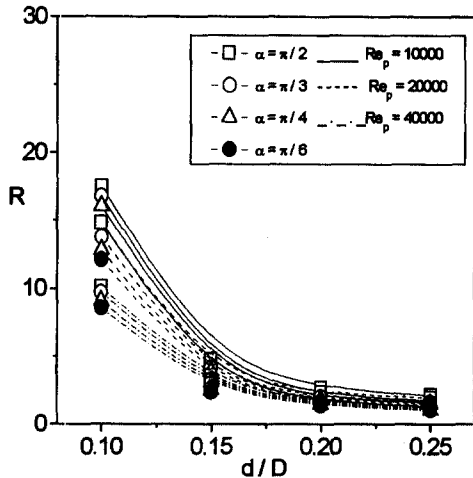


Fig. 9 Optimal velocity ratio, R as a function of diameter ratio, d/D .

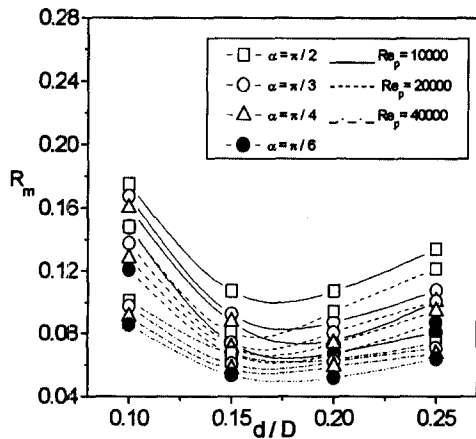


Fig. 10 Optimal momentum ratio, R_m as a function of diameter ratio, d/D .

여주고 있다. 그러나 직경비의 영향에 비해서는 매우 작으므로 직경비가 분지관 혼합과정에서 가장 중요한 역할을 하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 최적혼합조건에서 운동량비에 대한 직경비의 영향을 보여주고 있다. 놀라운 사실은 직경비가 약 0.17 근처에서 절대값은 차이가 있지만 본 실험의 거의 모든 측정범위에서 최적운동량비가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구에서 전혀 보고되지 않았던 중요한 설계 데이터이다. 최소운동량비가 나타나는 직경비는 Reynolds 수와 α 에 대해 약간의 차이를 보이고 있으나 그 범위는 넓지 않다. 최저운동량비가 존재하는 이유는 직경비가 너무 작으면 분사제트의 속도가 과도하게 커야 되므로 이에 따른 운동량 손실이 있을 수 있으며, 직경비가 너무 커지면 분사제트의 속도가 너무 작아 난류혼합의 효과가 줄어들기 때문이라고 판단되나 앞으로 이 조건에 대한 면밀하고 체계적인 연구가 필요하다.

4.4 주관 Reynolds 수에 대한 영향

여러 가지 직경비와 분지각도에 대하여 최적속도비에 대한 주관 Reynolds 수에 따른 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 최적속도비는 주관 Reynolds 수가 증가함에 따라 완만하게 감소를 한다. 직경비가 작을 때는 ($d/D=0.1$) 주관 Reynolds 수에 따른 효과가 중요하게 나타나고, 직경비가 클수록 ($d/D=0.15 \sim 0.25$) 주관 Reynolds 수에 대한 영향이 미약하게 나타난다. 주관 Reynolds 수가 높은 유동

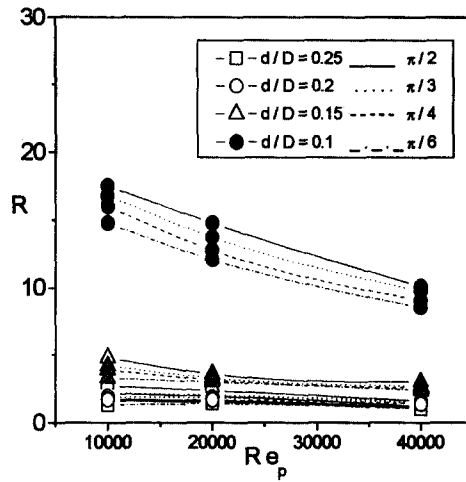


Fig. 11 Optimal velocity ratio, R as a function of pipe Reynolds number, Re_p .

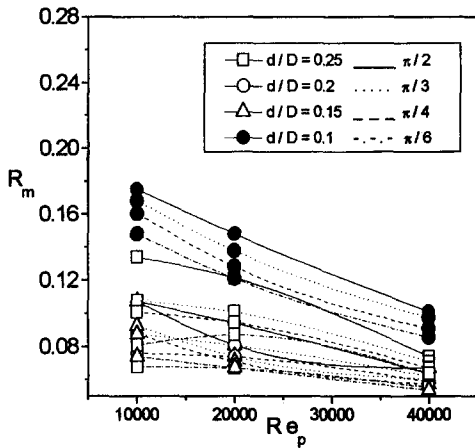


Fig. 12 Optimal momentum ratio, R_m as a function of pipe Reynolds number, Re_p .

에서의 최적 속도비 변화는 낮은 주관 Reynolds 수를 가지는 유동보다 그 변화가 작다. 왜냐하면 Reynolds 수가 높을수록 주관에서 혼합이 더 잘되게 하는 난류가 더욱 활발하기 때문이다.

Fig. 12는 최적운동량비에 대한 주관 Reynolds 수의 효과가 나와있다. 최적속도비와는 다르게 직경비가 작은 경우($d/D=0.1$)와 직경비가 큰 경우($d/D=0.25$)가 Reynolds 수에 민감하다. 그러나 전반적으로 주관 Reynolds 수와 커질수록 최적운동량비의 변동폭이 작아진다.

5. 결 론

유동 가시화에 의한 최적 혼합관정 기법으로 분지관 혼합에 미치는 여러 가지 변수들에 대한 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메탄 농도 추적법을 사용하여 검증한 결과 유동 가시화 현상으로 판단한 혼합 관정이 실험시간을 획기적으로 줄여주며, 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있었다.

(2) 최적속도비(R)는 여러 가지 유동조건에서 2에서 16사이로 나타났고, 최적운동량비(R_m)는 0.05~0.18 사이의 값으로 나타났다.

(3) 분지관에서의 효율적인 혼합조건을 얻기 위해서는 분지각과 주관 Reynolds 수 보다는 직경비가 가장 지배적인 변수임을 알았다.

(4) 최적혼합시 운동량비의 최소값이 나타나는 직경비가 발견되었고, 그 값은 $d/D \approx 0.17$ 근방이

다.

(5) 최적속도비와 운동량비는 주관 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소한다.

(6) 최적속도비와 운동량비는 분지각 α 가 감소할수록 줄어든다.

감사의 글

심사위원님들의 수정과 지적을 바탕으로 본 논문의 내용이 현저히 개선되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chilton, T. H., and Gerneraux, R. P., 1930, "The Mixing of Gases for Reaction, Transactions," *American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 25, pp. 103~122.
- (2) Ger, A. M., and Holly, E. R., 1974, "Turbulent Jets in Crossing Pipe Flow," *Hydraulic Engineering, Ser. No. 30*, University of Illinois, Urbana, IL.
- (3) Forney, L. J. and Kwon, T. C., 1979, "Efficient Single Jet Mixing in Turbulent Tube Flow," *AIChE J.*, Vol. 25, pp. 623~630.
- (4) Maruyama T., Mizushina. T. and Watanabe, F., 1982, "Turbulent Mixing of Two Fluid Stream at an Oblique Branch," *Intl Chem. Engrg, AIChE*, Vol. 22 No. 2, 287~294.
- (5) Hodgson, J. E., and Rajaratnam, N., 1992, "An Experimental Study of Jet Dilution in Cross Flow," *Can. J. Civ. Engrg.*, Canada, 19(5), p. 733.
- (6) Brucker, C. 1995, "Study of the Three-Dimensional Flow in a T-Junction Using a Dual-Scanning Method for Three Dimensional Scanning-Particle-Image Velocimetry(2-D SPIV)," *The Tenth Symposium on Turbulent Shear Flows*.
- (7) Fric, T. F. and Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet," *J. Fluid Mech*, vol. 279, pp. 1~47.
- (8) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow," *J.*

- Fluid Mech*, vol. 138, pp. 93~127.
- (9) Kelso, R. M., Lim, T. T. and Perry, A. E., 1996, "An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol 306, pp. 111~144.
- (10) Kelso, R. M. and Smits, A. J., 1995, "Horse-shoe Vortex Systems Resulting from the Interaction Between a Laminar Boundary and a Transverse Jet," *Phys. Fluids* 7, pp. 153~158.