

< 논문 >

## 원주상으로 배열된 다중 원형 제트의 유동 특성

진학수\* · 김성초† · 김정수\*\* · 최종욱\*\*  
(2006년 11월 17일 접수, 2006년 12월 26일 심사완료)

### Experiments on the Flow Characteristics of Circular Multiple Jets Arrayed Circumferentially

Haksu Jin, Sungcho Kim, Jeong Soo Kim and Jongwook Choi

**Key Words :** Axisymmetric Circular Jets(축대칭 원형 제트), Hot-wire Anemometer(열선 풍속계)  
Similarity(상사성), Jet Spreading(제트 확산)

#### Abstract

This paper describes the flow characteristics of circular multiple jet investigated by hot-wire anemometry. The nozzle arrays were classified into two cases; 6- or 7-nozzle located circumferentially in equal interval without or with a central jet. The flow field was measured according to the number of nozzles when the Reynolds number based on the nozzle exit is about  $10^4$ . Mean velocity, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy were investigated in the downstream of jets. The Tollmien's theory holds far downstream only when a nozzle locates at the center. Jet interaction is influenced due to with or without a center nozzle. In addition, the two-dimensional numerical computation was conducted for 3-nozzle case to obtain the general flow structure near the nozzle exit, which verifies the formation of the recirculation region with captive vortices, that is, the evidence of the interaction between jets.

#### 1. 서론

내부 유동에서 외부 유동으로 흐름이 바뀌는 단일 제트(single jet)는 벽면 효과(wall effect)가 제거됨으로써 분사 형태의 유동장이 형성되고 먼 하류까지 상사성(similarity)이 유지되면서 전개된다. 제트는 공학적인 응용 면에서 중요하며 2차원 또는 3차원 유동으로 구분되어 널리 연구되어 왔다. 단일 제트 유동에서 속도 분포는 상사 변수(similarity variables)를 사용하여 잘 알려진 이론으로 해석될 수 있고, <sup>(1)</sup> Wignanski & Fielder<sup>(2)</sup>는 선형화된 열선 풍속계를 사용하여 흐름에 대한 평균 속도와 난류 응력(turbulent stresses) 등을 측정하였다. 또한 Kim<sup>(3)</sup> 등은 열선을 사용하여 제트의 천

이 영역(transition region)에서 간헐도(intermittency)를 구하고, 지역평균(zone-average)으로 여러 고차 상관계수를 구하여 난류 특성의 통계학적인 해석을 하였고, Lee<sup>(4)</sup> 등은 평균 속도에서 각 변동 속도 성분의 상관계수(correlation)를 사용하여 레이놀즈 수 약  $10^4$  일 때 원형 제트의 천이 영역에서 대규모 구조(large-scale structure)에 관한 실험의 결과로서 와동(eddy)의 대류속도는 와동의 각 부분에 따라 다르며, 포텐셜 코어(potential core) 영역에 가까운 부분의 대류속도가 컸고 이로 인하여 와동이 하류로 갈수록 유동방향의 길이가 점점 커짐을 보였다.

다중으로 배열된 제트(multiple jets)에 관한 유동을 Fig. 1에 개념적으로 나타내었다. 이러한 유동에서는 속도 기울기가 없는 포텐셜 영역(potential core) 이후에 제트간에 상호작용(interaction)이 발생하고, 어느 지점부터는 서로 합쳐진 하나의 유동 특성을 갖게 된다. 또한 여러 가지 유동 중에서 대표적으로 복잡한 난류 유동 가운데 하나가 제트간의 상호작용이 존재하는 유동이다. 그 이유는 제트

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부  
E-mail : ksc@sunchon.ac.kr  
TEL : (061)750-3534 FAX : (061)750-3530

\* 회원, 순천대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부

간 상호작용 과정에서 압력, 속도, 레이놀즈 응력 (Reynolds stresses) 등이 급격히 변하고,<sup>(5-8)</sup> 배열된 제트가 서로 충돌하여 유동장 특성을 크게 바꿈으로써 난류 특성이 큰 영향을 받기 때문이다. 따라서 단일 제트와는 크게 다른 유동 형태가 된다. 이러한 제트 유동의 응용 분야는 엔진내의 압축 공기와 연료 분무의 혼합 현상이 있고, 로켓 모터에서 볼 수 있는 연료와 산화제 분사 노즐의 배열도 있으며, 도금 공정에서 불균일한 도금을 방지하기 위한 에어나이프(air-knife)를 비롯하여 연소기, 보일러, 냉각 시스템 등 매우 다양하다.

특히 연료 분무에서 다중으로 배열된 제트는 단일 제트와는 달리 두 제트가 교차하는 영역에서의 부와 접촉하는 경계의 축소로 인하여 주위 공기 유입(entrainment)이 변화하고 유효 제트 면적이 감소하게 된다. 그리고 제트간의 충돌에 의하여 연료의 미립화(atomization)가 불량해지며 액적(droplet)들의 거동도 변화된다.<sup>(9)</sup> 따라서 다중으로 배열된 제트의 상호 작용 전후의 유동 특성에 관한 연구는 매우 중요하다.

Capp<sup>(10)</sup>과 Hussein<sup>(11)</sup>은 레이저 유속계로 제트의 난류 강도(turbulent intensity)를 측정하였는데 실험값의 부정확한 원인이 재순환(recirculation) 효과에 의한 제트 운동량(jet momentum)의 감소 때문이라고 지적하였다. 다수의 원형 제트가 상호작용하는 예혼합화염(premixed flame)의 안정성 확보에 관한 실험으로부터 다수의 노즐에 연료와 공기를 혼합하여 공급할 때는 노즐 간격을 조절하여도 화염 날림(blowout) 현상이 있다는 것이 확인되었고 재순환 영역이 있는 상호작용 화염에서 온도장도 측정되었다.<sup>(12)</sup>

Rebeiro<sup>(13)</sup>와 Antonia 등<sup>(14)</sup>은 원형 제트(circular jet) 및 동축 제트(co-flowing jet)에 대해 주로 난류 혼합 영역에서 유동 구조, 평균 속도, 난류 강도, 난류 전단 응력 및 확률 밀도 분포 등을 측정 분석함으로써 난류 유동 특성과 혼합 유동의 구조를 규명하였다.

Okamoto<sup>(15)</sup>는 두 개의 원형 노즐을 평행하게 분사시켜 평균 속도와 정압(static pressure)을 측정하고 등속도 선도로부터 제트 단면 형상에 대해 해석하였으나 난류 특성은 언급하지 않았다.

Tanaka<sup>(16)</sup>는 두 개의 2 차원 평면 노즐(plane jet)을 평행하게 설치하여 평행 제트가 결합된 이후의 유동 구조를 단일 제트와 비교하였는데 속도 분포는 유사한 경향을 보이지만 난류는 전혀 다른 특성이 있다는 것을 규명하였으나 속도 변화에 대한 영향은 고려하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 동일한 원형 제트를 축에 대하여 대칭되게 원주상으로 배열하되 그 중심에 노즐이 있거나, 없는 경우를 해석하였다. 제트가

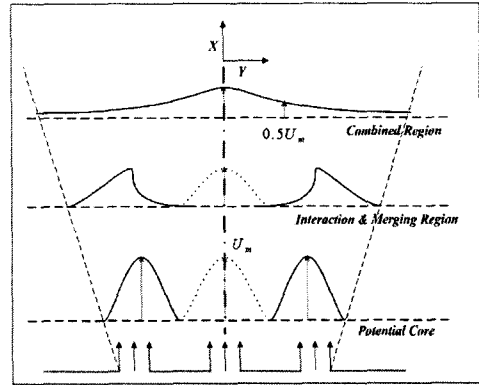


Fig. 1 Typical flow structure of multiple jets

서로 혼합되는 영역에서 주유동 방향으로의 유동 구조 및 특성을 살펴보기 위해서 평균 속도 분포, 레이놀즈 전단 응력, 난류 운동 에너지, 상사성을 조사하였다. 또한 노즐 출구 부근 및 상호 작용 영역에서 유동 및 와(vortex) 구조를 확인하기 위해서 간단한 수치 계산도 병행하였다.<sup>(17)</sup>

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

실험 장치(Fig. 2)는 풍동(wind tunnel), 열선 풍속계 및 실험 모형으로 구성되어 있다. 풍동은 노즐형(nozzle type)이며 최대 속도가 약 60 m/s이고 이때 노즐 출구에서 자유 난류 강도(free turbulent intensity)는 0.5% 미만이다. 2 차원 열선(X-probe)을 이용하여 정온형 열선풍속계(IFA300, TSI)로 유동을 측정하였다. 샘플링 주파수(sampling rate)를 1~20 kHz로 다양하게 변화시켜서 측정해본 결과 모든 경우에 오차율이 1%미만이었으며 본 연구에서는 10 kHz의 샘플링 주파수로 측정하였다.

실험에 사용된 노즐 배열은 Fig. 3 과 같다. 원형 노즐을 원주상에 60°간격으로 배열하고 중심에 노즐이 있거나 없는 경우로 구분하였으며, 따라서 노즐 개수는 6 개 또는 7 개이다. 노즐 지름은 5 mm 이고, 노즐 사이 간격은 지름의 2 배이다. 측정 범위는 주유동 방향으로  $x/d=2\sim50$  까지이며, 반지름 방향으로는  $u/U_m \geq 0.05$  범위에서 측정하였다. 여기서  $x$ 는 제트 축방향 좌표,  $d$ 는 노즐 지름,  $u$ 는 주흐름 방향 속도,  $U_m$ 은 중심 축방향의 각 측정 위치에서 최대 속도이다.

### 2.2 실험 방법

단일 제트의 주유동 방향 속도 분포를 상사성이

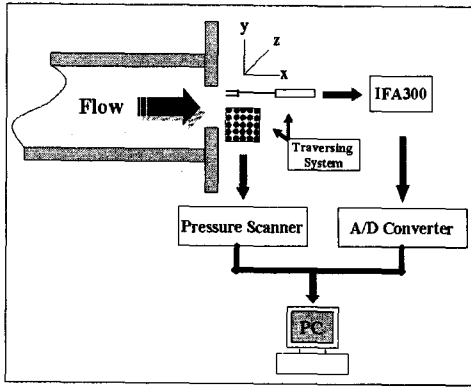


Fig. 2 Experimental apparatus

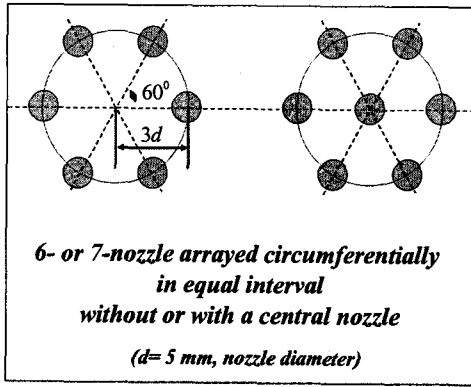


Fig. 3 Multi-jet models

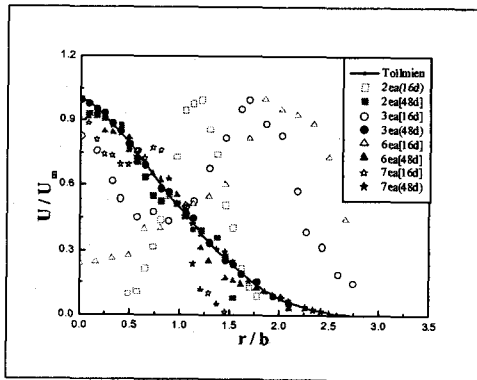


Fig. 4 Velocity distributions

적용되는 Tollmien 이론과 비교하기 위해서 평균 속도를 노즐 중심의 최대 속도로 무차원화하고 중심 최대 속도의 절반인 지점을 상사변수로 선택하였다. 또한, 주유동 방향에서 레이놀즈 전단 응력 및 난류 운동 에너지를 측정하였고, 중심에 노즐이 없거나 있는 경우에 바깥 노즐에 대해서 중심

최대 속도의 위치 변화를 주유동 방향에서 조사하였다. 또한 두 가지 경우에 대하여 제트 확산(jet spreading)도 살펴 보았다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 평균 속도 분포

Fig. 4에 다중으로 배열된 제트에서 주유동 방향 속도 분포를 반지름 방향 위치에 대해서 중심 속도의 절반인 지점을 상사 변수( $b$ )로 나타냈다. 단일 제트 상사성이 적용되는 이론 속도 분포식과 비교한 결과 중심에 노즐이 있는 7개의 배열의 경우 노즐 출구로부터 노즐 지름의 약  $32d$  인 지점부터 상사성을 보이기 시작하여  $48d$  인 지점에서는 Tollmien 곡선과 거의 일치하였다. 6 개 배열인 경우는 노즐 출구로부터  $48d$  인 지점에서 부분적인 상사성을 보였지만 엄밀한 상사성은 없고, 노즐 출구에 가까운  $16d$  지점에서는 큰 분산을 보였으며 이것은 각 제트간의 상호작용 때문이다.

Fig. 5-6은 유동 방향에서 조밀하게 측정한 평균 속도 분포를 나타낸 그림이다.  $2d$  에서는 독립된 노즐 출구 유동이 명확히 나타나고 상호작용은 아직 일어나지 않고 있으나  $16d$  에서는 상호작용이 일어난 것을 확인할 수 있다. 또한  $48d$  인 지점을 전후하여 상호작용이 완전히 일어나서 서로 합쳐진 속도 분포 형태를 보였고  $2 \sim 16d$  에서 평균 속도는 급격히 감소하였는데 이것 또한 상호작용 때문이다.  $16 \sim 48d$  에서 평균 속도 감소는 상대적으로 앞의 범위에서보다 완만하였으며 상호작용과 동시에 제트가 합쳐지고 있다. 중심 노즐의 유무에 따라 주유동 방향으로  $2 \sim 40d$  위치에서 반지름 방향으로 측정한 속도 분포가 Fig.'s 7-8에 있다. 노즐 출구로부터 주유동 방향으로 제트가 진행하면서 각각의 속도 분포는 배열의 중심 부분을 향해 이동하면서 상호작용에 의한 혼합이 일어나고, 약  $32d$  지점부터 제트 흐름이 강하게 합쳐지는 것을 확인할 수 있으며 주유동 방향으로  $48d$  인 지점을 보면 중심에 노즐이 없는 6개 배열보다 7개 배열의 경우가 단일 제트에 더 가까운 속도 분포를 보인다.

열선 풍속계로 측정이 어려운 제트 상호작용을 확인하기 위하여 2 차원 노즐 3 개를 일직선상에 배열하여 수치계산을 한 결과인 Fig. 9 에 노즐 출구 근처에서 일어나는 상호작용 유동장이 잘 나타나 있다. 노즐 출구로부터 약  $10d$  를 전후한 영역에서 제트 사이에 상호작용이 일어난 것을 알 수 있다. 또한 외부로부터 강한 유입이 발생하며

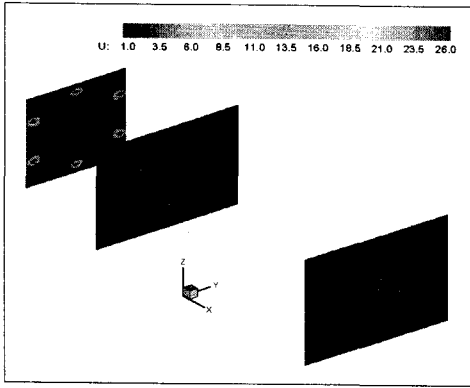


Fig. 5 Mean velocity distribution without the center nozzle

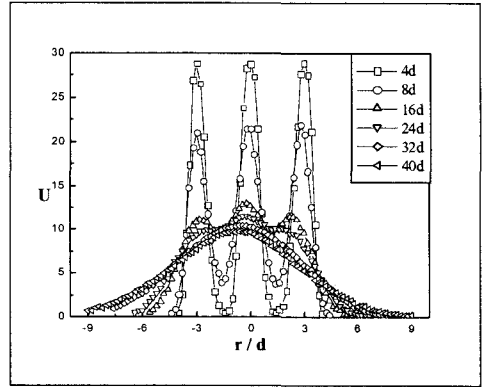


Fig. 8 Mean velocity profiles with the center nozzle

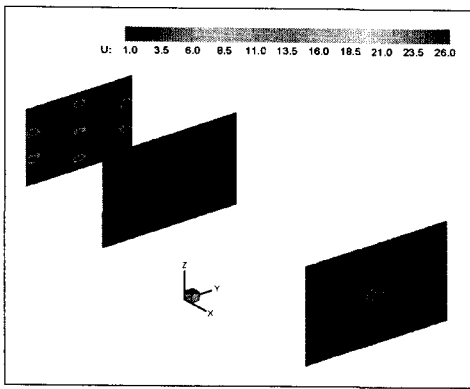


Fig. 6 Mean velocity distribution with the center nozzle

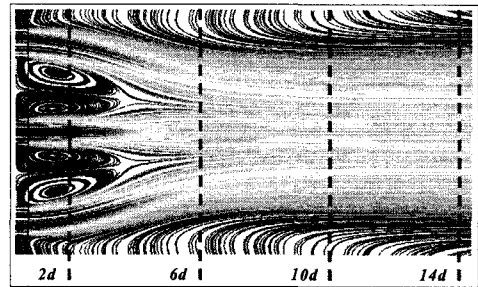


Fig. 9 Computed streamlines near the jets

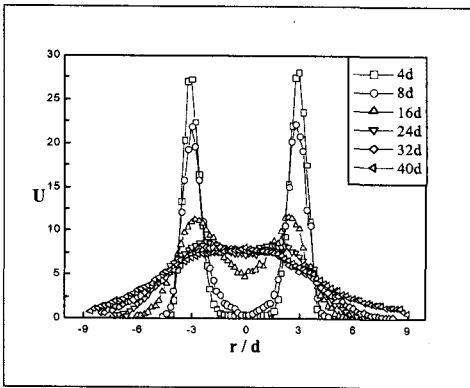


Fig. 7 Velocity profiles without the center nozzle

바깥에 위치한 제트에 비해 큰 속도를 갖는 중심 제트 부근에서 압력이 상대적으로 낮아지므로 바깥 제트 흐름이 안쪽으로 휘어진다. 이렇게 휘어져 들어온 유동이 전체 노즐의 중심선 위에서 서로 만났고 비교적 복잡한 유동장이 형성되었다.

주유동 방향으로 노즐 출구로부터 약  $\sim 32d$  범위에서 무시할 수 없이 큰 제트 상호작용이 발생한다. 이러한 상호작용에 의해서 재순환 유동이 존재하며 정체점(stagnation point)을 기준으로 노즐 출구쪽 상류에서는 역류(reverse flow)가 발생하고 포획된(captive) 비대칭 와(asymmetric vortex)가 쌍으로 형성된다. 정체점 이후에 하류에서는 각각의 제트가 서로 합쳐져서 새로운 유동으로 발달해 가며 단일 제트와 비슷한 유동 구조를 보인다.

### 3.2 레이놀즈 응력과 난류 운동 에너지 분포

Fig. 10~11은 주유동 방향에서 노즐 출구로부터 상호작용이 활발히 일어날 것으로 예상되는  $16d$  지점과 각 제트가 합쳐져서 단일 제트 유동 분포를 보일 것으로 예상되는  $48d$  지점의 레이놀즈 전단 응력과 난류 운동 에너지를 나타낸 것이다. 난류 특성 값들은 노즐 출구에 가까운 곳에서는 각 노즐 출구에서 큰 값을 보였으며, 이들은 노즐 중심인 반지름 방향  $r/d=3$ 에서 노즐 배열 중심( $r/d=0$ )으로 이동하다가 하류로 가면서 작아졌으며 바깥 노즐의 최대값들은 노즐 중심인 반지름 방향  $r/d=3$ 에서 노즐 배열 중심 쪽으로 이동하

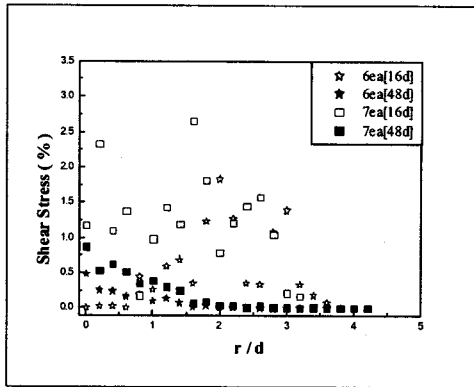


Fig. 10 Reynolds shear stress distribution,  $(-\overline{u'v'})/U_m^2 \times 100$

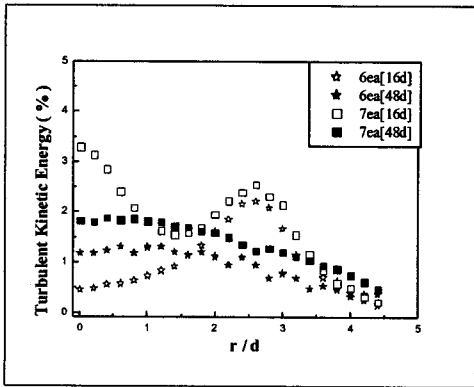


Fig. 11 Turbulent kinetic energy distribution,  $\left\{ \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/U_m^2 \right\} \times 100$

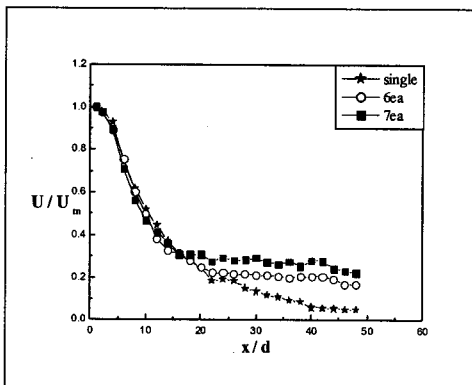


Fig. 12 Streamwise velocity reduction

다가 주유동 방향으로 48d에서는 중심에서 최대 값을 보였다. 따라서 주유동 방향으로 약 48d 전후에서 각 제트가 완전히 합쳐졌다고 판단할 수 있으며, 이때 중심의 최소값들은 7개 배열의 경우에서 더 큰 값을 보였다. 또한 난류 특성은 유동의 불안정성(flow instability)과 관련되는데 Fig. 9~10의 속도 분포에서 변곡점(inflexion point)들이 존재하는 부근에서는 상대적으로 큰 값들을 보였다.

3.3 속도 감소 및 그 위치 변화

Fig. 11~12는 주 유동 방향에 대하여 속도 감소와 바깥 노즐의 최대 속도의 위치 변화를 나타낸 것이다. 모두 단일 제트와 비교하여 노즐 출구로부터 약 16d까지는 비슷한 감소율을 보였다(Fig. 12). 하지만 약 20d 이후에서는 단일 제트와 비교하여 속도가 완만하게 감소하였다. 특히 노즐 출구로부터 약 16d까지 급격한 속도 감소율을 보이다가 7개의 배열은 약 16d부터, 6개의 배열은 약 20d부터 단일 제트에 비해 완만한 속도 감소를 보였는데 감소율은 7개의 경우가 더 완만하였다. 그 이유는 중심에 배열된 제트가 바깥 제트에 비하여 상대적으로 속도가 크므로 중심에 제트가 없는 6개의 배열보다 속도 감소율을 줄이는 역할을 한 때문이다. 또한 중심에 노즐이 있는 경우는 없는 경우보다 상호작용이 빠르고 활발하게 일어나며 제트가 합쳐지는 위치 또한 더 앞쪽이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 13으로부터 주유동 방향에서 바깥 노즐의 최대속도 위치는 노즐 출구에서 반지름 방향으로 3d이며, 이곳은 바깥 노즐의 중심이다. 전체 노즐의 중심(r/d=0)에서 얼마나 빨리 최대 속도를 갖는가로 판단할 때 7개 배열인 경우는 약 16d, 6개 배열은 약 24d 근처에서 최대 속도를 보였다. 이것은 각 제트간에 상호작용의 활발성과 더불어 합쳐지는 정도를 잘 나타내 주고 있다.

3.4 제트 확산

제트 확산(jet spreading)은 Fig. 14에서처럼 상호작용이 발생하여도 선형적으로 증가를 하며 흐름이 발달한다. 6개와 7개 배열의 경우 모두 확산 정도는 비슷하였으나 단일 제트의 확산각이 약 8°~10°인 것에 비하여 5°로 더 작았다. 그 이유는 상호작용 및 혼합에 의하여 바깥에 위치한 제트가 중심 제트로 휘어지면서 제트 경계(jet boundary)의 축소에 의한 것으로 판단된다.

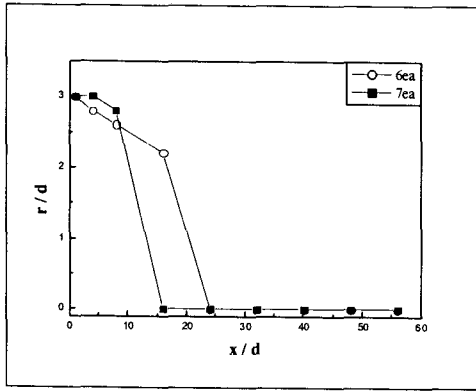


Fig. 13 Position of outside maximum velocity

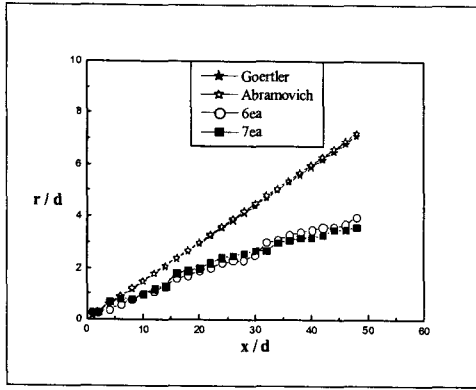


Fig. 14 Jet spreading

#### 4. 결론

동일한 모양의 여러 개 노즐을 원주상에 대칭으로 배열하되 중심에 노즐이 있는 경우(7 개)와 없는 경우(6 개)로 나누어 열선풍속계로 실험하고 수치계산을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Tollmien 이론 속도 분포식과 비교한 결과 하류 방향으로 각각의 제트가 합쳐져서 새로운 유동장으로 발달된 것으로 판단되는 48d 지점에서 7 개의 배열에서는 일치하였으나 6개의 배열에서는 엄밀한 상사성이 발견되지 않았다.

(2) 난류 응력 분포가 노즐 출구에 가까운 곳에서는 노즐 중심 ( $r/d = 3$ )에서 최대값을 보였다. 바깥 노즐에서는 노즐 중심에서 최대값이고 하류 방향으로 갈수록 중심쪽으로 이동하다가 48d에서는 배열 중심 ( $r/d = 0$ )에서 최대값이 되며, 유동 방향 속도 분포의 변곡점 부근에서 큰 값을 보였다.

(3) 주유동 방향의 속도 감소율은 중심 노즐 유무에 관계없이 모두 단일 제트에 비하여 노즐 출구로부터 약 20d 이후에서 완만하게 감소하며 7 개 배열이 6 개 배열보다 바깥 노즐의 최대속도 위치가 주유동 방향의 배열 중심에서 더 빨리 나타났다.

(4) 제트 확산은 6 개 및 7 개 배열 모두에서 비슷하게 선형적으로 증가하였으나, 단일 제트에 비해서 작았다.

(5) 제트 출구 근처에서는 강한 외부 유입이 있고 압력장의 불균형으로 바깥 제트 유선은 배열 중심으로 휘어지며 상류에서는 포획된 한 쌍의 비대칭 와류로 된 재순환 유동이 존재한다.

#### 후기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)과 순천대학교 산학협력중심대학에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Rajaratnam, N., 1976, Turbulent Jets, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 27~49.
- (2) Wygnanski, I. and Fielder, H., 1969, "Some Measurements in the Self-preserving Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp. 577~612.
- (3) Kim, S. K., Cho, J. R. and Chung, M. K., 1990, "An Experimental Study About the Intermittent Flow Field in the Transition Region of a Turbulent Round Jet," *Trans. of the KSME*, Vol. 14, No. 1, pp. 230~240.
- (4) Lee, T. S. and Choi, O. S., 1985, "Large-Scale Structure of Circular Jet in Transitional Region at Reynolds Number of  $10^4$ ," *Trans. of the KSME*, Vol. 10, No. 6, pp. 823~829.
- (5) Rew, H. S. and Park, S. O., 1990, "Turbulence Characteristics of a Merged Jet from Two Opposing Curved Wall Jets," *KSAS Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 3022~3031.
- (6) Rew, H. S. and Park, S. O., 1996, "The Triple-Moment Transport of the Merged Jet Arising From Two Opposing Curved Wall Jets," *KSAS Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 1010~1017.
- (7) Gilbert, B. I., 1988, "Turbulent Measurements in a Two-dimensional Upwash," *AIAA Journal*, Vol. 26, pp. 10~14.
- (8) Kim, D. K. and Yoon, S. H., 2005, "Experimental Investigation of Two Parallel Plane Jets," *Trans. of the KSME B*, Vol. 29, No. 2, pp. 214~223.
- (9) Yoon, S. J., 1998, "A Study on the Flow Characteristics in the Mixing Region of Parallel Round Jets," *KSAS Journal*, Vol. 26, No. 8, pp. 31~69.

- (10) Capp, S. P., 1983, "Experimental Investigation of the Turbulent Axisymmetric Jet," Ph. D, thesis, Univ. at Buffalo, SUNY.
- (11) Hussein, J. H., Steven, P. C. and William, K. G., 1994, "Velocity Measurements in a High Reynolds Number, Momentum Conserving Axisymmetric Turbulent Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, pp. 31~75.
- (12) Lee, S. and Lee, B. J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 4, pp. 461~466.
- (13) Ribeiro, M. M. and Whitelaw, J. H., 1975, "Statistical Characteristics of a Turbulent Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, part. 1, pp. 1~15.
- (14) Antonia, R. A. and Bilger, R. W., 1973, "An Experimental Investigation of an Axisymmetric Jet in a Co-flowing Air Stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, part. 4, pp. 805~822.
- (15) Okamoto, T. and Yagita, M., 1985, "Interaction of Twin Turbulent Circular Jet," *Bulletine of JSME*, Vol. 28, No. 238, pp. 617~622.
- (16) Tanaka, E., 1974, "The Interference of Two-Dimensional Parallel Jets," *Bulletine of JSME*, Vol. 17, No. 109, pp. 920~927.
- (17) Comsol, Multiphysics, User's Guide, Ver 3.3, Comsol AB, 2006.