

원주상으로 배열된 원형 제트의 유동 측정

진학수* · 김성초** · 김정수** · 최종욱**

Flow Measurements of Circular Jets Arrayed Circumferentially

Haksu Jin* · Sungcho Kim** · Jeong Soo Kim** · Jongwook Choi**

ABSTRACT

This study investigates the flow field of multiple-jet measured by hot-wire anemometry. The experiments were classified into two cases; 6- or 7-nozzle located circumferentially in equal interval without or with a central jet. The effect of the number of nozzles the flow field was examined when the Reynolds number based on the nozzle diameter is about 10^4 . Mean Velocity, normal and Reynolds stresses were measured in the downstream of jets. The Tollmien's theory holds far downstream at 48d apart from the nozzle exit especially when a nozzle locates at the center. The general flow characteristics is influenced due to the number of nozzles.

초 록

본 연구에서는 열선풍속계를 이용하여 다중 제트 유동장을 측정하여 해석하였다. 노즐배열은 원주상에 등간격으로 배열되었으며, 중심에 노즐이 있거나 혹은 없는 두 가지 경우로 분류하였다. 두 가지 경우의 레이놀즈 수가 노즐 출구에서 약 10^4 일 때, 평균 속도, 레이놀즈 응력 등을 측정하였다. Tollmien의 이론 속도 분포식은 중심에 노즐이 있는 경우에서 노즐 출구로부터 약 48d인 지점에서 성립하였다. 최대속도 감소와 상호작용은 중심 노즐의 유무에 의존한다.

Key Words: Axisymmetric Circular Jets(축대칭 원형 제트), Tollmien's Theory(Tollmien 이론), Similarity(상사성), Hot-wire Anemometer(열선 풍속계)

1. 서 론

제트(jet)는 공학적인 응용 면에서 중요하며 널

리 연구되어 왔다. 단일 제트 유동에서 속도 분포는 상사 변수(similarity variables)를 사용하여 잘 알려진 이론으로 기술된다.[1], Wignanski 와 Fielder[2]는 선형화된 열선 풍속계(hot-wire anemometer)를 이용하여 평균 속도, 난류 응력(turbulent stresses) 등을 측정하였다.

다중으로 배열된 제트에 관한 유동에서는 속

* 순천대학교 대학원 기계공학과

** 순천대학교 기계우주항공공학부

연락처, E-mail: ksc@sunchon.ac.kr

도 기울기가 없는 포텐셜 영역(potential region) 이후에 제트간 상호 작용(jet interaction)이 발생하고, 어느 지점부터는 서로 합쳐진 단일 유동 분포를 갖게 된다. 이러한 상호 작용이 존재하는 유동은 복잡한 난류 유동의 예인데 그 이유는 상호 작용 과정에서 압력, 속도, 레이놀즈 응력(Reynolds stresses) 등이 급격히 변하고[3-6], 따라서 유동장 특성이 크게 바뀔으로써 난류 특성이 큰 영향을 받기 때문이며 단일 제트와는 크게 다른 유동 형태가 된다.

상호 작용을 포함한 제트 유동의 응용은 엔진 내의 압축 공기와 연료 분무간의 상호 혼합 현상이 있고, 로켓 모터에서 볼 수 있는 연료와 산화제 분사 노즐의 배열도 있으며, 도금 공정에서 불균일 도금을 방지하기 위한 에어나이프(air-knife)와 같은 형태로 응용되고 연소기, 보일러, 냉각 시스템 등 많은 공학 분야에서 사용되고 있다. 특히 연료 분무에서 다중으로 배열된 제트는 단일 제트와는 달리 두 제트가 교차하는 영역에서 주위 유체 유입(entrainment)이 변화하고 제트간의 충돌 등에 의하여 미립화(atomization)가 불량해지며 액적들의 거동 등도 변화하게 된다[7].

본 연구에서는 원형 제트를 축에 대하여 등간격 및 대칭으로 분포시키되 중심 노즐의 유무에 대하여, 상호 혼합되는 전후의 유동 구조 및 특성을 규명하기 위해 주유동 방향에 대하여 평균 속도 분포, 난류 응력 등을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 풍동(wind tunnel), 열선 풍속계로 구성되어 있다. 풍동은 노즐형(nozzle type)이고 모터 출력은 3.7 Kw이다. 최대 속도 측정 범위는 약 60 m/s이며 이때 노즐 출구에서 자유 흐름의 난류 강도(turbulent intensity)는 약 0.5% 미만이었다. 속도 측정은 정온형 열선 풍속계(IFA300, TSI)를 사용하였고, 2차원 프로브(X-probe)를 이용하여 속도를 측정하였다. 실험에 사용된 노즐 배열은 축대칭 원형 제트에 대

하여 지름이 5 mm인 노즐을 원주상에 등 간격으로 배열하고 중심에 노즐이 있거나 없는 경우로 구분하였으며 따라서 노즐 개수는 7개 또는 6개이다.

측정 범위는 주유동 방향으로 $x/d = 4 \sim 56$ 까지이며, 반지름 방향으로 $u/U_m \geq 0.05$ 범위에서 측정하였고, 주유동 방향에서 평균속도, 상사성(similarity), 레이놀즈 응력 등을 조사하였다. 여기서 x 는 제트 축방향 좌표, d 는 노즐 지름, u 는 주흐름 방향 속도, U_m 는 중심 축방향으로 각 측정위치에서 최대 속도이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평균 속도 분포

주유동 방향위치에서 반지름 방향으로 측정된 속도 분포에서 Fig 1~2와 같이 유동장의 대칭성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 원주상에 배열된 노즐의 원점을 중심으로 절반에 대하여 조사하였다.

Figure 3은 주유동 방향 속도 분포를 반지름 방향 위치에 대해서 단일 제트의 상사성이 적용되는 이론 속도 분포식(Tollmien's theory) $u/U_m = f(r/b)$ 로 나타낸 것이다. 여기서 r 은 반지름, b 는 중심속도의 1/2지점이다. 단일 제트의 속도 분포와 비교한 결과 중심에 노즐이 있는 배열의 경우 노즐 출구로부터 약 32d인 지점부터 부분적인 상사성을 보였으며, 약 48d인 지점에서는 일치하였다. 그러나 중심에 노즐이 없는 배열의 경우에는 엄밀한 상사성이 나타나지 않았다.

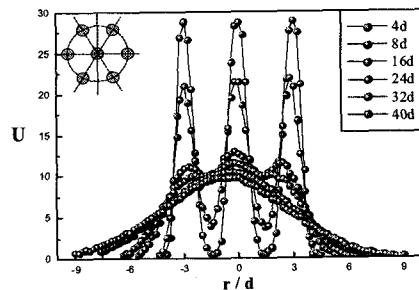


Fig. 1 Velocity profile with the center nozzle

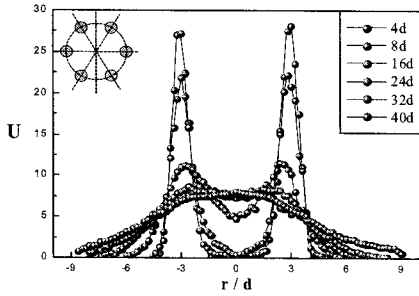


Fig. 2 Velocity profile without the center nozzle

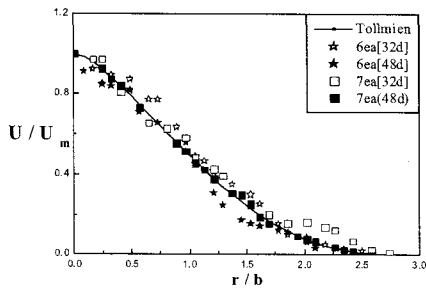


Fig. 3 Comparison of tollmien's theory

3.2 레이놀즈 응력 및 난류 운동 에너지 분포

Figure 4~5는 유동 방향에서 노즐 출구로부터 상호 작용이 활발히 일어날 것으로 예상되는 16d인 지점과 제트가 합쳐진 유동을 보일 것으로 예상되는 48d인 지점의 레이놀즈 전단 응력과 난류 운동에너지를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 난류 특성값은 노즐 출구에 가까운 곳에서는 각 노즐 출구에서 큰 값을 보였고, 하류로 가면서 작아졌으며 바깥 노즐의 최고값들은 노즐 중심인 반지름 방향 $r/d=3$ 인 지점에서 노즐 배열 중심($r/d=0$) 쪽으로 이동하다가 48d인 지점에서는 중심에서 최대값을 보였다. 따라서 약 48d 전후에서 각 제트가 합쳐졌다고 판단할 수 있으며 이때 중심의 최고값들은 중심에 노즐이 있는 7개 배열의 경우가 큰 값을 보였다. 또한 난류 특성은 유동의 불안정성과 관련되는데 속도 분포에서 변곡점(inflexion point)

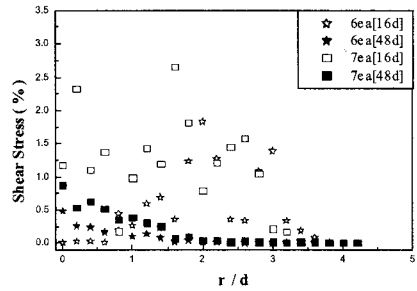


Fig. 4 Reynolds shear stress distribution,

$$\overline{u'v'}/U_m^2 \times 100$$

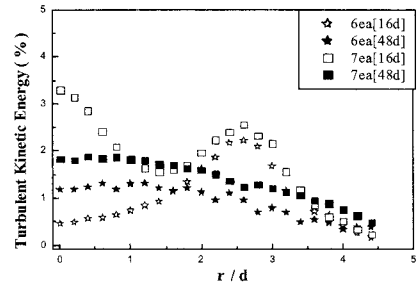


Fig. 5 Turbulent kinetic energy distribution,

$$\frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/U_m^2 \times 100$$

들이 존재하는 부근에서는 상대적으로 큰 값들을 보였다.

3.3 제트 상호작용

열선 풍속계로 측정이 어려운 제트사이의 상호작용을 확인하기 위하여 상용코드(comsol)를 이용하여 간단한 수치계산을 수행하였고 Fig. 6에 나타내었다. 외부에서 강한 유입이 있는데 이로 인해 바깥에 위치한 제트에 비해 상대적으로 큰 속도를 갖는 중심의 제트와의 압력 불균형으로 바깥 제트의 흐름이 안쪽으로 휘어졌다. 이렇게 휘어진 유동이 전체 노즐의 중심선 위에서 서로 만남으로써 비교적 복잡한 유동장이 형성되었다. 즉, 유동방향으로 노즐 출구로부터 제트 상호 작용이 발생하였다. 이러한 상호 작용에 의해서 재순환 유동(recirculation)이 존재하게 되

고, 이때 정체점(stagnation point)을 기준으로 노즐 출구쪽 상류(upstream)에서는 역류(reverse flow)가 발생하였으며 포획된 비대칭 와(captive asymmetric vortex)가 쌍으로 형성된다.

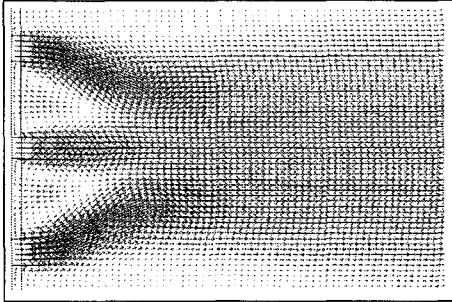


Fig. 6 Vector field near the exit

4. 결 론

동일한 6, 7개의 노즐이 원주상에 등간격으로 배열된 경우를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중심에 노즐이 있는 배열에서 상사성은 노즐 출구로부터 약 $48d$ 인 지점에서 일치하였으나 중심에 노즐이 없는 경우 엄밀한 상사성은 발견되지 않았다.
- (2) 유동 방향 레이놀즈 전단 응력 분포는 바깥 노즐의 경우 노즐 중심($r/d=3$)에서 최대값을 보이다가 $48d$ 인 지점에서는 배열 중심($r/d=0$)에서 최대값을 보였으며, 특히 유동 방향의 속도 분포에서 변곡점이 존재하는 부분에서 큰 값을 보였다.
- (3) 제트사이에 무시할 수 없는 상호작용이 있고 노즐 출구 근처에 재순환 영역이 존재한다.

후 기

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

참고문헌

1. Rajaratnam. N., Turbulent Jets, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp.27~49, 1976.
2. Wygnanski, I. and Fielder, H., "Some Measurements in the Self-preserving Jet," J. Fluid Mech., Vol. 38, pp.577~612, 1969.
3. Rew, H. S. and Park, S. O., "Turbulence Characteristics of a Merged Jet from Two Opposing Curved Wall Jets," KSAS Journal, Vol. 19, No. 3, pp.3022~3031, 1990.
4. Rew, H. S. and Park, S. O., "The Triple-Moment Transport of the Merged Jet Arising From Two Opposing Curved Wall Jets," KSAS Journal, Vol. 24, No. 1, pp. 1010~1017, 1996.
5. Lee, S. and Lee, B. J., "Characteristics of Interacting Lifted Flames," KSME Journal, Vol. 25, No. 4, pp.461~466, 2001.
6. Antonia, R. A. and Bilger, R. W., "An Experimental Investigation of an Axisymmetric jet in a Co-flowing Air Stream," J. Fluid Mech., Vol. 61, part. 4, pp.805~822, 1973.
7. Yoon, S. J., "A Study on the Flow Characteristics in the Mixing Region of Parallel Round Jets," KSAS Journal, Vol. 26, No. 8, pp.31-69, 1998.