

축대칭 회전분사류의 초기 유동특성

안영희*, 한용운†, 김동식**

(2001년 4월 11일 접수, 2002년 2월 21일 심사완료)

Flow Characteristics of Axi-symmetric Swirl Jet in the Initial Regions

Young Hee Ahn, Yong Oun Han and Dong Sik Kim

Key Words : Swirl Number(선회값), Similarity(상사성), Hot Wire Anemometry(열선 유속계), Core Radius(핵반경), Turbulence Kinetic Energy Budget(TKE Budget, 난류운동에너지분배)

Abstract

Flow characteristics of a round jet with swirl number of 0.17 have been investigated using a hot-wire anemometry in the initial region within 10D(exit diameter). Swirl effects were observed by comparing centerline flow characteristics, similarities and turbulent budgets of a swirl jet and a free jet, respectively. To obtain similarity of the radial profiles mean velocity and higher moments were measured at the vertical planes, located at 2.5, 5.0, 7.5D, 10D, respectively. The centerline velocity characteristics were also measured. It is turned out that similarities of mean and Reynolds stress are established. The jet boundary has wider width than that of a free jet and the shear stress also becomes stronger. In addition the centerline decay becomes faster than that of the free jet, indicating that the swirl induces more entrainment in the initial region of the swirl jet by transferring the axial mean kinetic energy into the swirl energy and, therefore, has wider boundary, compared with that of free jet.

기호설명

D	: 노즐 출구 직경, m
R, r_0	: 노즐 반경, m
S	: 선회값
Γ	: 순환값, m^2/s
U, V, W	: 각 방향 평균속도성분, m/s
u, v, w	: 각 방향 난류성분, m/s
uw, vw	: 각 방향 난류응력, m^2/s^2
r_c	: 핵 반경, m
U_c	: 중심 방향 속도성분, m/s
ϵ	: 소산율, m^2/s^3
l/d	: 유효 감지 길이비

1. 서론

회전 분사류는 짧은 거리에서 충분히 전개된 흐름을 유도하여 충분한 양의 혼합유동을 얻을 수 있는 장치로서 내연기관 또는 가스터빈의 연료와 공기의 혼합과정에서 유효하게 사용된다. 또한, 자유 분사류에 비하여 분사류경계 내외의 압력구배를 강하게 유도하여 외부 유동의 유입을 증대시킨다. 따라서, 회전 성분을 얻기 위한 경제적인 장치가 사용될 수 있다면 혼합유동을 얻고자 하는 공학적인 측면에서 유용한 결과를 제공한다.

한편, 회전 분사류는 자유 분사류에 회전 성분을 인위적으로 중첩시킨 구조로 이해할 수 있다. 이러한 특징은 터보기계, 프로펠러 및 헬리콥터 로터 등에서 발생하는 끝와류들의 회전 세기를 조절하기가 매우 어렵다는 측면에서 볼 때, 회전 분사류의

* 영남대학교 대학원 기계공학부

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
Email : yohan@yu.ac.kr

** TEL : (053)810-2454 FAX : (053)813-3703
회원, 포항 1 대학 자동차과

회전 성분을 인위적으로 조절할 수 있는 점은 매우 유용한 측면이다. 그러나, 회전 분사류에서 큰 회전성분을 얻기가 쉽지 않다. Wu 등⁽¹⁾과 Feyedelem 등⁽²⁾의 실험결과로부터 판단할 때, 선회값 S (swirl number), S 가 약 0.1 이하에서는 불안정한 헬리컬유동이 발생되고 0.1 이상에서는 축대칭적인 회전분사류를 얻으며 0.5 이상에서는 축대칭외류의 붕괴가 진행됨을 시사한 바 있다. 또한, 난류모델을 다루는 입장에서 볼 때, 회전 분사류는 자유 분사류에 비하여 회전속도 및 회전 성분이 동반된 난류항들을 발생시킴으로서 평형방정식의 많은 항들에 대한 정보를 제공한다. 따라서, 모델식의 효율성을 점검하기에 매우 유용하다.

따라서, 본 연구에서는 축대칭의 회전유동을 얻었을 때, 측정된 속도장 및 난류값들을 이용하여 회전 분사류의 초기유동 구조가 기존의 자유분사류 및 끝외류들이 가지는 특성과 어떻게 다른지 비교하여 회전분사류를 이용하는 장치의 유동장 특성을 제공하고자 한다.

2. 실험조건 및 방법

유동발생장치는 5 마력 3 상의 AC 모터로 구동되는 원심식 송풍기, 직경 0.3m의 원형관에 벌집망과 스크린으로 조합하여 구성된 유동안정장치, 면적수축비 9:1인 원형 수축관으로 구성되었다. 회전분사류를 발생시키기 위하여 수축관 출구와 같은 0.1m 직경의 원형관을 연결하고 원형관의 일부를 회전관으로 하여 내부에 5mm인 직경과 길이 50mm인 플라스틱 빨대로 벌집망을 구축한 후 베어링과 외부의 모터와 풀리에 의하여 강제 회전되도록 하여 회전크기를 조절하였다. 이후 같은 직경의 관을 이은 후에 마지막으로 면적수축비 9:1인 2차 수축부인 노즐을 이용하여 분사류가 전개되도록 하였으며 수축부의 출구노즐에서 20m/sec($Re_D = 0.4 \times 10^5$)의 일정 속도를 유지하여 실험을 하였다. (Fig. 1)

회전분사류의 속도분포를 측정하기 위하여 2 채널 열선유속계(KANOMAX7000)와 X형의 열선센서를 사용하였다. 열선센서는 각각, 5 μ m 직경인 텅스텐 재질로 구성된 가는 선에 구리(Cu)로코팅을 하여 프롱에 연결되었으며, 측정 유효길이가 약 1mm로서 l/d 의 크기가 약 200 이되어 길이 방향의 세밀한 공간 분해능을 확보하였다. 두 열선면 사이의 거리는 0.001m이며 교차각도는 84° 였다.

측정 공간으로서는 분사류 중심축 상에서 노즐출구로부터 노즐 직경(D)의 2.5, 5.0, 7.5, 10 배인 위치를 선정하여 중심축에 수직인 평면에서 3mm 사각 격자를 구성하여 축 방향속도 및 회전속도성분들을

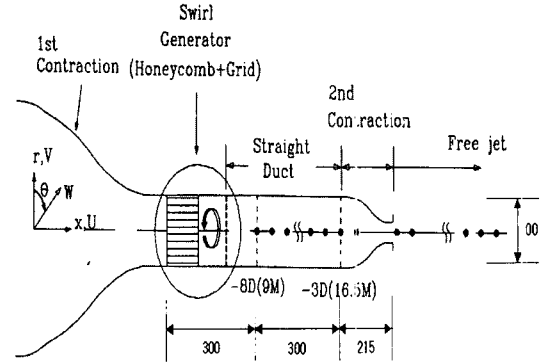


Fig. 1 Schematics of swirl jet generator

계측하여 대칭성을 점검하였다. 대칭성이 확보된 조건에서 평균속도와 난류 및 Reynolds 응력 분포를 얻기 위하여 중심을 지나는 단일 직선을 선택하여 반경 방향으로 세밀격자를 구성하고 10000 개의 샘플을 채취하였다. 세밀격자는 12 μ m의 분해능을 가지는 3차원 이송장치를 이용하였고, 각 측정점에서 3차원 속도성분을 얻기 위하여 매번 열선축을 90° 회전시켜 얻었다. 따라서, 2 채널 열선유속계를 이용하여 U-V, U-W 및 각각의 난류강도와 난류응력을 측정하였다. 이때, 각 성분의 시간평균값 취득에는 문제가 없으나, 난류응력 값들은 직접 얻을 수가 없으므로 준 3차원 기법⁽³⁾에 의하여 구하였다. 2차모멘트 계산 시 오차가 수반되나 유동장 전체의 정성적 특성을 이해하는 면에서는 충분하며 이에 관련한 오차분석은 참고문헌(3)에 상술되어 있다.

3. 실험결과

3.1 대칭성

자유분사류에 비하여 회전분사류는 축대칭 형상을 얻기가 매우 힘들다. 이론적으로 분사류 중심에 대하여 축대칭 형상을 얻어야 하지만 분출속도와 회전성분 간에 안정성 문제가 발생하기 때문에 회전이 충분치 않으면 헬리컬(helical)한 유동 현상이 생긴다. 이들의 특성을 양적으로 판단하기 위하여 선회값을 다음과 같이 정의하는데, 기본적으로 축방향 모멘텀과 회전방향 모멘텀과의 비례식⁽¹⁾으로 이해 할 수 있다.⁽²⁾

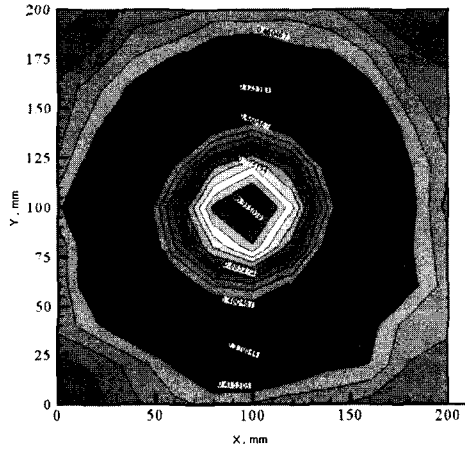


Fig. 2 Contour of axial velocity component measured at the plane of 5D

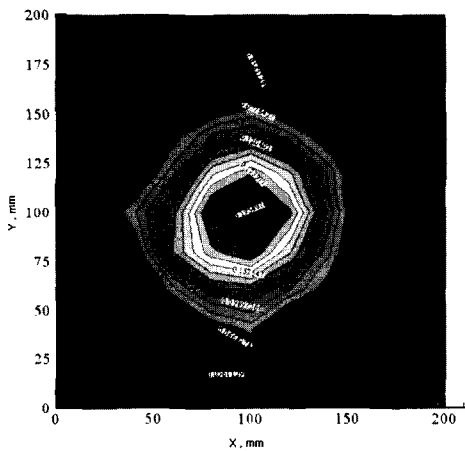


Fig. 3 Contour of axial turbulence intensity measured at the plane of 5D

$$S = \frac{\rho \int_0^R (UW + \overline{uv}) r^2 dr}{\rho \int_0^R \left[U^2 + \overline{u^2} - \frac{1}{2} (\overline{W^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \right] r dr \bullet R} \quad (1)$$

위 식에서 분모는 축방향 모멘텀 플럭스, 분자는 회전방향 모멘텀 플럭스로서 단순히 한 단면에서 회전 속도의 적분항을 축속도의 적분항으로 나눈 값에 난류항들을 보완한 의미를 가진다. Fig. 2 와 3 은 노즐 출구에서 5D(출구직경)의 위치에서 측정된 축방향 속도성분과 난류강도의 분포로서 대칭성을 이루고 있다. 이때, 얻어진 선회값은 0.17 로서 Wu 등⁽¹⁾과 Feyedelem 등⁽²⁾ 이 제시한 선회값에서 대칭적 와류가 발생되는 영역과 일치한다.

이와 같이 대칭적 유동에서 선회유동의 중심을 포

함하는 반경방향의 유동특성을 얻기 위하여 동일한 회전 조건을 유지하여 출구로부터 각각, 2.5D, 5.0D, 7.5D 및 10.0D 위치단면에서 반경방향으로 모멘트 측정과 대칭성 실험을 수행 하였으며 유동중심을 따라 유동구조를 계속하였다.

3.2 반경방향 특성

축대칭 선회 유동에서 노즐 출구로부터 2.5D, 5D, 7.5D, 10D 하류위치단면에서 반경방향으로 측정된 축 방향, 반경방향, 원주방향의 평균속도분포를 U_c 로 무차원하여 Fig. 4-7 에 나타내었다.

Fig. 4 를 보면 무차원 반경 $r/R = 3.0$ 일 때 축방향성분이 최소값이 되었다가 바깥에서 다시 증가하는 특성을 보인다. 이는 회전분사류가 경계에서 자유분사류에 비하여 유입 유동이 풍부해지는 것을 의미한다. 열선 센서의 특성상 방향을 인지하지 못하기 때문에 반경 3.0 바깥 실험값들을 가로축에 대하여 상하 대칭 이동시켜서 재작성하여 절대량으로 표현하였다. 회전 성분 W 역시 왼쪽의 분포값들이 양수값을 나타냈으나 회전성분으로 해석하기 위하여 중심점에 대하여 점대칭이 되도록 정리하였다.

이와 같은 인위적인 실험값들의 정리를 통하여 동반되는 자료의 신뢰성은 반경 3.0 바깥 실험값들의 최대값들이 중심속도에 비하여 약 7% 정도로 계측이 되므로 축방향 성분은 약 7%의 수직이동 구간이 발생한다. 따라서, 축방향 성분에 대한 오차한계는 준 3 차원 기법에 의한 측정오차 및 샘플오차 5%를 포함하여 전체 누적오차는 12%로 예상된다. 한편, 회전 성분은 약 10% 이내의 오차를 동반하여 상대적으로 선회유동에 대한 오차가 자유분사류에 비하여 크게 나타나지만 회전분사류의 정성적인 특성을 관측하는 면에서는 무리가 없다고 판단된다.

이러한 결과에 의하면 축방향 속도성분(U)은 자유분사류와 유사한 분포를 보이고 회전속도성분(W)은 전형적인 Rankine 복합와류의 형상을 보인다. 반경방향 속도성분(V)은 중심에서 미약하지만 약 $r/D=2$ 근처까지 양의 값을 유지하면서 세력을 유지하므로 핵중심으로부터 와류중심영역이 확대되는 경향이 있음을 알 수 있다.

같은 방식으로 처리된 Fig. 5 는 5D 위치에서의 3 가지 속도성분들의 분포를 나타낸 것으로 반경 $r/R=6$ 의 위치에서도 축방향 성분의 분사경계폭을 찾기가 힘든 정도로 회전분사류가 확대된 모습을 보여준다. 또한 2.5D 의 경우에 비하여 회전성분이 미약하며 사실상 이 위치 이후에서의 회전 특성은 Fig. 6, 7 에서 보는 바와 같이 미약한 속도값들로 표현되는 회전분사류의 폭이 측정범위를 벗어날

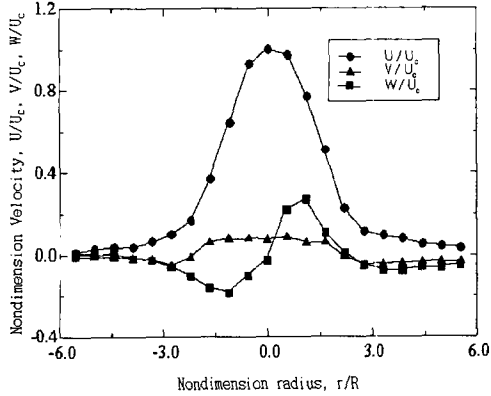


Fig. 4 Axial, radial and circumferential velocity components measured at the plane of 2.5D

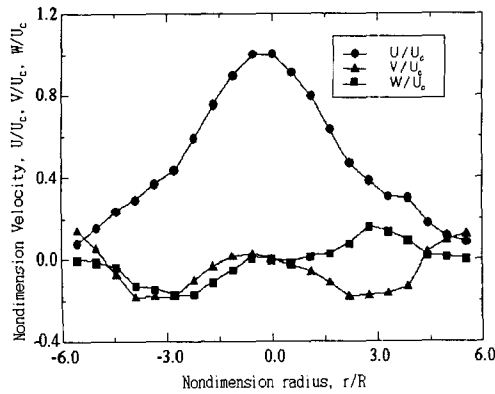


Fig. 5 Axial, radial and circumferential velocity components measured at the plane of 5D

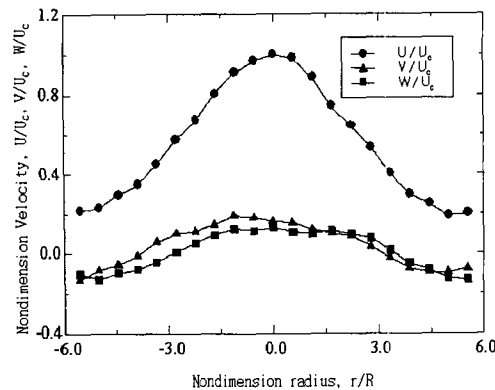


Fig. 6 Axial, radial and circumferential velocity components measured at the plane of 7.5D

정도로 나타나 본실험의 결과로는 찾기가 힘든

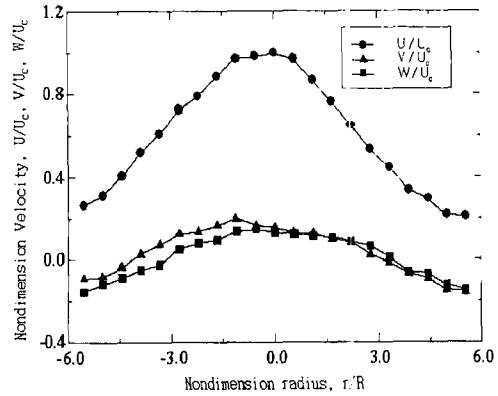


Fig. 7 Axial, radial and circumferential velocity components measured at the plane of 10D

것을 알 수 있다.

이러한 현상은 초기의 선회유동에 의한 유입유동이 강하게 동반되어 축방향 속도성분이 급격히 감소된 후에 하류로 갈수록 점차 선회방향의 전단력에 의한 감쇠에 의하여 자유분사류 보다 빨리 분사류 특성을 소멸해 감을 알 수 있다.

3.3 선회분사류와 와류의 특성

2.5D 에서 측정된 선회속도성분은 약 0.8D 의 반경을 갖는 강제와류가 되면서 전형적인 복합와류형상을 보였다. 일반적으로, 자유와류의 특성을 갖는 Rankine 복합와류인 끝와류 형상은 다음의 Vatistas 의 대수 모형식⁽⁴⁾에 잘 맞는 형상을 유지한다.

$$\bar{W} = \frac{\bar{r}}{\left[1 + \bar{r}^{-2n}\right]^{\frac{1}{n}}}, \quad \bar{r} = \frac{r}{r_c} \tag{2}$$

위 식에서 n 은 실험적으로 얻어지는 지수로서 일반적으로 회전익의 끝와류는 n=2, 고정익의 끝와류는 n=1 에 수렴하는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 얻어진 선회와류를 자연발생적인 날개 끝와류나 로터블레이드 끝와류들과 비교하기 위하여 선회값분포를 구하여 비교하였다. 특정 반경에서의 회전속도에 의한 국부순환값은 식 (3)으로 정의된다.

$$\Gamma_{local}(r) = \oint \bar{W} \cdot \vec{dl} \tag{3}$$

그러나, 식 (3)은 와류가 축대칭으로 발전된 것을 감안할 때, 단순히 $\bar{W}(r)$ 값으로 표현하여 지역 순환값들을 비교할 수 있으므로 특정 반경 r 위치에서는 식 (4)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Gamma_{local}(r) = 2\pi r \bar{W}(r) \quad (4)$$

위 식을 무한반경에서의 최대 순환값, Γ_{max} 로 무차원하여 Tung⁽⁵⁾이 제안한 반로그(semi-log) 좌표계에서의 순환분포로 계산하여 Fig. 8 과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 8 에서 관찰된 바와 같이 기존의 끝와류들의 특성인 Tung⁽⁵⁾과 Vatisas⁽⁴⁾의 모형에 비하여 선회분사류의 경우는 핵반경(r_c) 내에서 두 모델보다 훨씬 강한 선회성능을 유지하지만, 핵반경 밖으로 나가면서 곧 감쇠함으로 선회와류는 다른 와류에 비하여 전혀 다른 특성을 갖는 것으로 이해된다.

기존 와류들은 와류형성 과정에서 와류경계 부근의 전단력이 강하게 형성이 되어 와류 밖의 유동을 순차적으로 회전시키도록 유도한다. 그러나, 회전분사류의 경우는 노즐로부터 토출모멘텀이 크기 때문에 경계부근에서의 전단력 보다는 유입유동에 의한 영향이 강하게 나타나 동반 선회경향이 쇠락하는 특징을 가지게 된다. 이러한 현상은 기존의 와류들이 상당한 기간 동안 하류에서 그 형태를 유지하는 반면에 선회분사류는 매우 짧은 기간 동안 선회유동이 존재한 후 사라지는 특성을 가짐을 말해준다. 따라서, 선회와류는 기존의 자연와류와 전혀 다른 특징을 나타낸다.

3.4 난류특성

Fig. 1 에서 개략적으로 표시된 것과 같이 분리된 튜브안에 허니콤을 넣어 구성한 회전 유동발생장치와 접해있는 사각 그리드로 구성된 난류발생단면을 동시에 회전시키므로서 회전유동에 인위적인 난류를 발생시키도록 하였다. 따라서, 회전분사류에 동반된 특정 난류세기가 하류로 전개되는 과정을 살펴보았다. (Figs. 9-12)

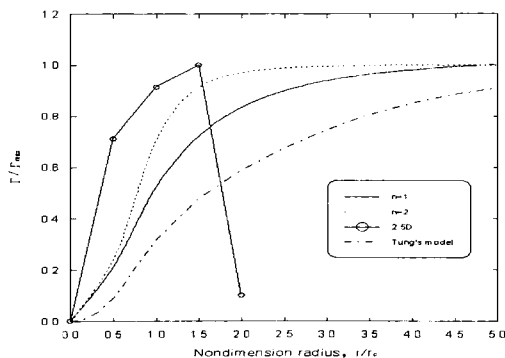


Fig. 8 Circulation profiles measured at 2.5D

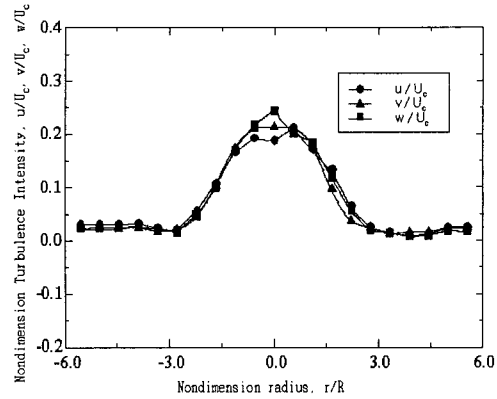


Fig. 9 Axial, radial and circumferential turbulence components, x=2.5D

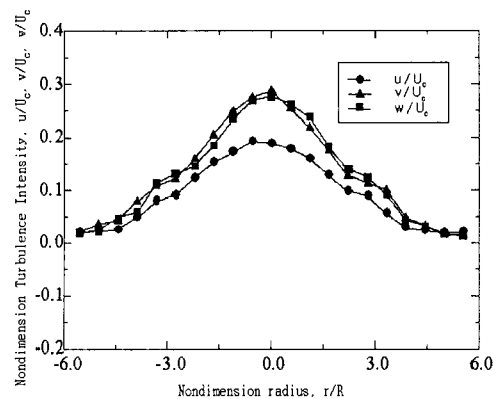


Fig. 10 Axial, radial and circumferential turbulence components, x=5D

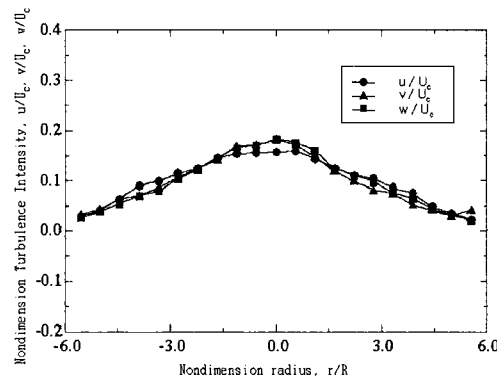


Fig. 11 Axial, radial and circumferential turbulence components, x=7.5D

각 위치에서의 3 방향 난류성분들은 비교적 등방성 분포를 보이며 중심에서의 난류강도가 상대적으로 큰 값을 가지고있다. 특히, 2.5D 분포에서는 자유분사류의 경계에서 축방향 난류강도가 중심보다 강한 특징을 보이는 것에 비하여 전혀 다른 양상을 보여주고 있다. 이러한 특성은 다음 절에서 자유분사류의 중심 유동 특성과 비교하여 회전분사류의 난류 감쇄특성을 해석함으로써 회전 분사류의 하류유동 특성을 예측하는데 유용한 자료를 제시한다.

Figs. 4, 5 에서 보는 바와 같이 초기에 상당한 등방성의 난류구조를 유지한 난류는 5D 의 위치에서 축방향 난류성분이 급격히 작아지는 특성을 보였다. 이는 Han 등⁽⁶⁾이 관찰한 와류 신장구조의 특성을 보이는 과정으로 해석된다. 즉, 회전하는 코어유동 영역이 일시적으로 수축되어 축방향 난류성분이 작아지지만 중심을 따라서 일정양의 회전 모멘텀을 유지하기 위하여 반경방향 성분이 상대적으로 커지는 현상이 발생되었음을 암시한다. 이후영역에서는 이러한 현상이 사라지는데, 이 것은 자유분사류와 매우 상반된 현상으로서 선회구조에 의한 직진성이 매우 짧은 구간에 일시적으로 유지되었다가 사라지는 것으로 해석되어진다.

3.5 난류 운동에너지 분배

일반적으로 회전축에 수직한 면에서 나타나는 속도 및 난류량들에 의한 난류운동에너지 분배특성은 분사류나 와류의 난류구조를 이해하는데 도움을 준다. 따라서, 유동축에 수직한 한 단면에서 반경방향의 난류 운동에너지 평형을 살펴보게 되면 각 항의 비중을 서로 비교할 경우, 축방향의 평균운동에너지 전달항이 매우 작게 평가되어 나타나지 않으므로 다음과 같이 반경방향으로 간략화 된 TKE 평형방정식(5)을 얻을 수 있다.⁽⁷⁾

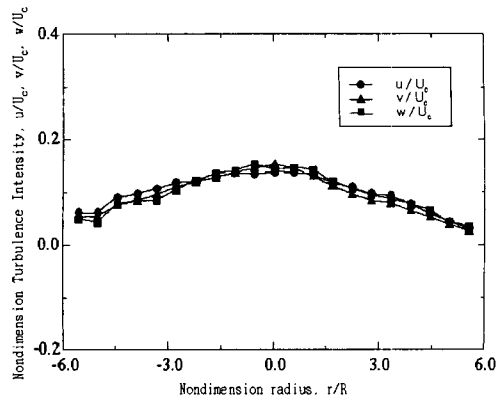


Fig. 12 Axial, radial and circumferential turbulence components, x=10D

$$0 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{wq^2} + \frac{\overline{wq^2}}{r} \right) - \left(\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial r} + \overline{vw} \frac{\partial W}{\partial r} + \overline{vw} \frac{W}{r} - 2\overline{v^2} \frac{W}{r} \right) - \varepsilon \tag{5}$$

위 식의 우변 각 항들은 확산항, 생성항들의 주요항들과 소산항을 나타내고 있으며 특히, 소산항은 두 항들과의 평형관계식에서 얻는다. 위 식의 생성항을 계산하기 위하여 난류응력값들의 분포를 측정된 결과 Fig. 13 의 결과를 얻었다.

기존의 끝와류들의 난류응력은 vw 성분이 주도적인 역할을 하는 특성과는 달리, 회전분사류는 uw 성분이 주도적인 세력으로 작용하는 것을 알 수 있다.

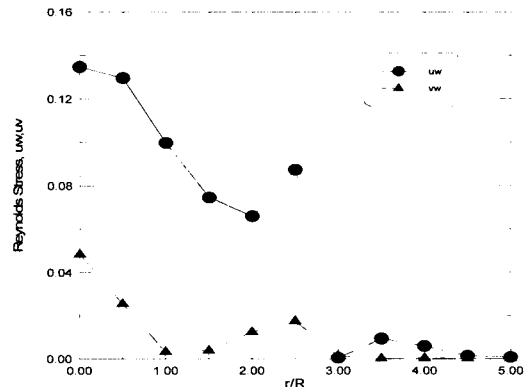


Fig. 13 Reynolds stresses of uw and vw measured at x=2.5D

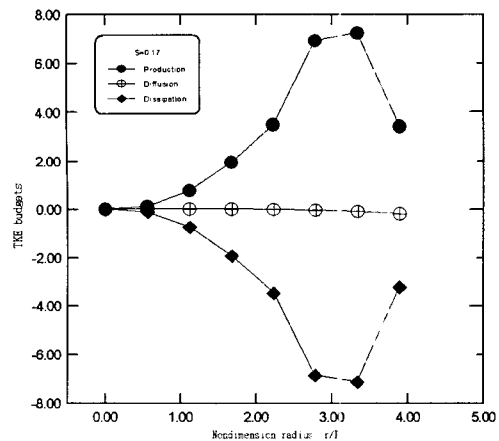


Fig. 14 TKE budgets along radial direction

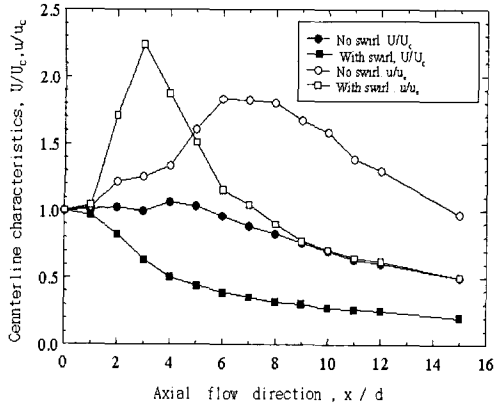


Fig. 15 Comparisons of mean velocities and turbulences of free jet and swirl jet

따라서, 회전분사류는 Fig. 14 에서 보는 바와 같이 uw 성분이 난류 생성의 주도적인 역할을 하면서 생성향과 소산향이 평형을 주도하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 선회분사류는 여전히 분출 모멘텀이 강하여 회전 보다는 분사류의 특징을 유지하는 것으로 해석된다

4. 선회분사류의 특성

4.1 축 방향 유동특성

Fig.1 과 똑같은 장치로서 선회특성을 배제한 선형 실험으로 얻어진 자유분사류의 특성⁽⁸⁾과 본 실험의 결과와 비교하여 중심축에 따라 변화하는 축방향 속도성분의 감쇠특성을 Fig.15 에 나타내었다.

이 결과들은 반경방향 상사성에서는 잘 알 수 없는 유동특성을 설명할 수 있게 한다. 자유분사류의 경우 축방향의 중심속도가 어느 정도까지 출구속도를 유지하다가 그 이후 선형적 감쇠구간이 나타나는 데 반하여 선회유동은 초기에 빠르게 감쇠한 후, 완만한 감쇄 특성을 보였다. 이러한 현상은 선회분사류의 축방향의 평균운동에너지가 선회현상에 의한 유입유동의 증가에 의하여 반경방향으로 분산되어 급감하여 분출 모멘텀을 잃어버리는 결과로 이해 된다. 회전분사류의 난류성분들은 자유분사류에 비하여 훨씬 초기에 축방향 난류가 급증하여 활발한 혼합과정이 이루어지는 현상을 보인다. 이것은 평균운동에너지가 자유분사류에 비하여 빠르게 난류에너지로 소모되는 상황을 잘 설명하고 있다. 따라서, 선회분사류의 난류감쇠가 일찍 일어남을 알 수 있다.

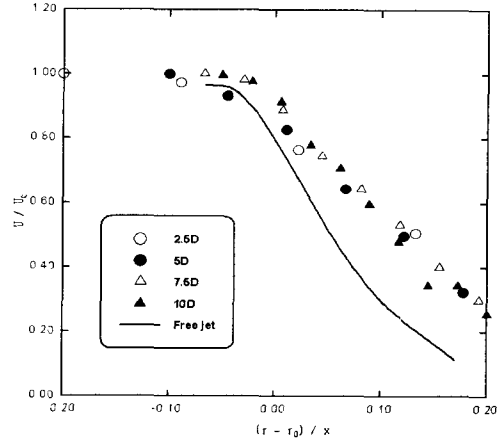


Fig. 16 Similarity of axial mean velocities of Swirl jet, comparison with free jet

4.2 반경 방향 유동특성

선회 분사류의 축방향 속도성분들이 반경방향으로의 상사성을 갖는지 알아 보기 위하여 다음식과 같이 각 위치에서의 중심속도 U_c 로 무차원된 속도와 노즐 출구에서의 거리비로 무차원된 노즐반경과의 관계식 (6)을 이용하여 Figs.16, 17 에 도시하였다.⁽⁸⁾

$$U/U_c = f\{(r-r_0)/x\} \quad (6)$$

낮은 선회수($S=0.17$)조건에서 선회 분사류의 축방향 속도는 하류로 갈수록 상사성이 잘 유지되는 것이 확인 되었으며, 변화추세는 일정한 경향성을 가지나 자유분사류 보다 넓어지는 추세를 나타내었다. 이는 Fig.16 에서 알 수 있듯이 $S=0.17$ 조건에서 선회분사류의 경우 축 방향 중심속도가 자유분사류의 축 방향 중심속도 보다 급격히 감쇠하는 이유는 회전분사류의 경계가 반경방향으로 많이 확대되었다는 사실을 잘 설명하고 있다.

이러한 현상은 앞에서 언급되었지만 선회분사류의 전개초기에 유입유동이 존재하여 반경방향으로 활발한 평균운동에너지의 교환이 이루어진 사실을 설명한다. Fig.17 에서 보는 바와 같이 축 방향 난류강도는 5D 위치를 전후로 하여 분사경계 부근의 축방향 난류 분포가 현격히 작아지면서 상사성이 존재하지 않는 추세를 보였다. 이는 선회분사류 초기구간에서 활발한 혼합이 일어나다 또다른 유동형태로 안정화되어 가는 과정으로 이해된다.

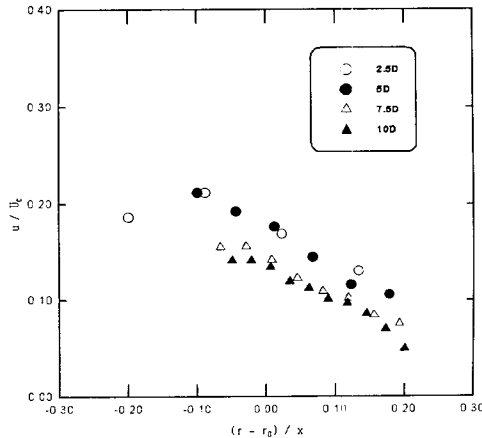


Fig. 17 Similarity of axial turbulent intensities of swirl jet

5. 결론

선회값, $S=0.17$ 이고 출구에서의 레이놀즈 수가 $Re_D = 40,000$ 인 조건에서 선회분사류의 하류 2.5D, 5D, 7.5D, 10D 인 4 개의 위치에서 측정된 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 선회와류의 분류경계는 자유분사류에 비하여 확대된 상사성을 갖는데 이는 자유분사류에 비해 전단력이 추가로 발생하여 초기에 많은 유입유동(entrainment)이 동반된 원인으로 해석된다.

(2) 강제로 생성된 선회분사류의 선회속도분포는 기존의 자연와류 즉, 날개끝 와류들과는 다른 양상을 보인다. 이것은 자연와류에 비하여 초기에 유입유동의 영향을 받아서 자유와류(free vortex)의 형상이 소멸되는 것으로 해석된다.

(3) 선회분사류는 자유분사류에 비하여 초기영역에서 평균운동에너지가 난류에너지로의 전환이 빠르게 일어나고 특히, 생성항에서 uw 성분이 주도적이 되면서 난류운동에너지 분배에서 생성항과 소산항이 균형을 이루며 에너지 분배를 주도하는 것으로 관측된다.

후 기

본 논문은 BK21 지역대학 기계산업고등인력 양성사업단(주관대학; 영남대학교)의 RA 지원 사업에 의한 것으로서 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Wu C. and Farokhi S., 1992, "Spatial Instability of a Swirling Jet-Theory and Experiment.", AIAA journal, Vol.30, No.6, pp.1545-1552.
- (2) Feyedelem M. S. and Sarpkaya T., 1998, "Free and Near Surface Swirling Turbulent Jets." AIAA journal, Vol.36, No.3, pp.359-364.
- (3) 한용운, 배황, 1999, "고정익 끝와류의 난류 운동에너지 분배 특성", 대한기계학회논문집, B 권, 제 23 권, pp. 1444-1452.
- (4) Vatisias, G. H., Kozel, V. and Mih, W. C., 1991, "A Simpler Model for Concentrated Vortices." Experiments in Fluids, Vol.11, pp.73~76.
- (5) Tung, C., Pucci, S. L., Caradonna, F. X. and Morse, H. A., 1983, "The Structure of Trailing Vortices Generated by Model Rotor Blades," Vertica, Vol.7, pp.33~43.
- (6) 한용운, 이장환, 1998, "수축부와 확대부의 중심 유동에서 나타나는 대칭적 난류 구조에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, B 권, 제 22 권
- (7) Han Y. O., Leishman J. G. and Coyne A. J., 1997, "Measurements of the Velocity and Turbulence Structure of a Rotor Tip Vortex." AIAA Journal. Vol.35, No.3, pp.477-485.
- (8) 김동식, 1994, "난류 분사류의 가상원점에 대한 실험적 연구", 영남대학교 기계공학과 박사학위논문.
- (9) Kitoh O., 1991, "Experimental study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe." J.Fluid Mech. Vol.225, pp.445-479.
- (10) Jacquin L., Leuchter O., Cambon C. and Mathieu J., 1990, "Homogeneous Turbulence in the presence of rotation." J.Fluid Mech. Vol.220, pp. 1-52.
- (11) Sislian J.P. and Cusworth R.A., 1934, "Measurements of Mean Velocity and Turbulent Intensities in a Free Isothermal Swirling Jet," AIAA Journal, Vol.24, No.2, pp.303-309.
- (12) Gibson M. M. and Younis B. A., 1986, "Calculation of Swirling Jets with a Reynolds Stress Closure." Phys. Fluids, Vol.29, No1, pp.38-48.
- (13) Billant P., Chomaz J. and Huere P., 1998, "Experimental study of vortex Breakdown in Swirling jets." J. Fluid Mech, Vol.376, pp.183-219.
- (14) Ahmed S.A. and Ronald M.C., 1987, "Characteristics of Air Jet Discharging Normally into a Swirling Cross flow," AIAA journal Vol.25 NO.3, pp.429-435.
- (15) Fujii S., Eguchi K. and Gomi M., 1981, "Swirling Jets With and Without Combustion", AIAA journal, Vol.19, pp.1438-1442.
- (16) 이상준, 백승조, 1993, "LDV 를 이용한 3 차원 유동 측정", 대한기계학회 열.유체 공학 부문 학술강연회 논문집, pp.221-245.