

〈論 文〉

소용돌이 성분이 있는 축대칭유동의 중심난류 특성

남경덕* · 한용운**

(1994년 3월 26일 접수)

Centerline Turbulent Characteristics of an Axisymmetric Flow with the Swirl

Kyong Dug Nam and Yong Oun Han

Key Words : Swirl Effect(소용돌이 효과), Decay of Turbulence Decay(난류 쇠퇴지연), Isotropic Flow(등방성유동), Decay Rate(쇠퇴율)

Abstract

The swirl effect on an axisymmetric turbulence has been investigated along its centerline by the hot wire anemometry. Flow facility to generate and control the swirl has been built by using the rotating honeycomb and grid. For the case of internal flows, as the strength of the swirl increases the flow tends to be locally isotropic by modifying the radial and the rotational components mainly. In comparison with those of the plain free jet, the decay of the centerline turbulences seems to be delayed substantially even with a slight swirl component.

1. 서 론

보편화된 난류유동의 실험적인 해석은, 1930년대 부터 시작된 격자난류(grid turbulence)에 의한 유 동해석과 1970년대부터 일어나기 시작한 소용돌이 (swirl)에 의한 난류유동해석 그리고 가장 최근에 부각되기 시작한 격자난류와 소용돌이의 혼합에 의 한 3차원 난류유동에 대한 해석이 있다. 격자난류 와 단순 소용돌이 유동이 2차원 난류유동으로 간주 되는 반면에 격자난류에 소용돌이 유동이 수반된 혼합유동은 전형적인 3차원 난류유동으로서 그 현 상이 아주 복잡하다. 따라서 유동현상을 해석하고 이해하기가 용이치 않다. 그러나 격자난류에 소용 돌이 유동이 동반됨으로 말미암아 난류유동은 더욱 활발해지고, 소용돌이 성분의 영향에 의해 난류유 동의 세기가 지속적으로 유지될 것이며, 더불어 에 너지 전달이 촉진됨으로써 제반 효율을 증진시킬

수 있으리라는 개념하에 최근에 학계나 산업현장에 서 이러한 유동에 대해 이해하고, 응용하려고 하는 노력이 많이 일어나고 있다.

격자난류에 관한 연구는 1930년대에 Taylor⁽¹⁾가 균질난류(homogeneous turbulence)의 등방성난류 (isotropic turbulence)에 대한 개념을 도입하면서, 균질난류와 등방성난류를 쉽게 생성하기 위한 대표 적인 방법으로서 격자난류가 인식되어 왔고, 이후 에도 많은 학자들에 의해 격자난류에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다. Batchelor와 Townsend^(2,3,4) 는 격자에 의해 발생된 난류유동장에서의 난류구조 와 난류운동에너지 쇠퇴(decay of turbulence kinetic energy)에 관한 법칙을 보고했고, Uberoi,^(5,6) Comte-Bellot과 Corrsin⁽⁷⁾ 그리고 Corrsion⁽⁸⁾ 등은 격자난류의 하류에 수축부(contraction)를 장치함 으로 보다 효율적인 등방성유동을 생산할 수 있다 는 것과 격자의 형태와 solidity에 따른 난류유동의 특성과 난류 운동에너지 쇠퇴에 관하여 보고했다. 또 최근에는 한용운⁽⁹⁾ 그리고 한용운과 남경덕⁽¹⁰⁾은 격자난류에서 유동전개부와 수축부 그리고 자유분

*정회원, 영남대학교 대학원

**정회원, 영남대학교 기계공학과

사류로 이어지는 유동장에서 난류운동이 수축부에 의해서 상류의 난류유동이 영향을 받는다는 것과 자유분사류의 하류에서도 난류성분의 쇠퇴법칙을 만족한다는 사실을 발견하였다.

1970년대에 들어서면서 소용돌이 유동에 대한 연구가 시작되었는데, Johnston 등⁽¹¹⁾은 유동관에 축방향으로 구르는(rolling) 회전유동을 발생시켰을 때, 코리올리효과(Coriolis effect)에 의해 안정화된 벽면층(wall layer)과 불안정화된 벽면층이 발생되고 이것에 의해 안정화된 영역의 벽면층에서는 레이놀즈응력(Reynolds stress)과 난류에너지생성(turbulence energy production)이 줄어들고 따라서 유동을 층류화시키게 된다는 결과를 발표했다. Koyama 등⁽¹²⁾은 회전하는 유동관의 수축부뒤의 직사각형 시험부에서 유동관의 회전에 의한 코리올리효과가 시험부의 층류경계층과 난류경계층의 발달을 억제하기도 하고, 촉진하기도 한다는 사실을 보고 했다. 또 Ibbetson과 Tritton⁽¹³⁾은 회전하는 환형원통(annular container)속에 정착된 격자사이로 유동이 상하로 움직이고 있는 유동장에서 환형원통의 회전성분의 크기에 따라 난류성분의 쇠퇴가 비례하고 있다고 밝혔다. Habib와 Whitelaw⁽¹⁴⁾는 동심축을 가지는 환상형의 돌연확대관에서 소용돌이 유동이 없을 때보다 소용돌이 유동이 있을 때, 평균속도와 난류강도성분의 최고값 영역이 돌연확대관의 출구영역근처로 이동한다는 것과, 평균속도의 쇠퇴가 현저히 빨라진다는 결과를 발표하였다. 최근에 Clausen 등⁽¹⁵⁾은 소용돌이 유동이 존재하는 원추형 확대관에서, 소용돌이 경계층(swirling boundary layer)의 발달변화에 대한 실험을 통해 소용돌이 성분은 확대관의 코어영역(core region)에서 재순환유동(recirculation flow)을 발생시키고 따라서 유동성능을 저하시킬 수 있는 요인이 되는 반면에 확대관에서의 경계층박리를 지연시키고 압력을 회복시켜주는 요인으로도 작용한다고 보고했다. Kitoh⁽¹⁶⁾은 원형직선관의 내부에서 소용돌이 강도(swirl intensity)의 변화에 따른 유동특성에 대한 연구를 통해, 원주방향의 속도성분(tangential velocity)이 관을 따른 유동구조에 중요한 영향을 끼친다는 것과, 관을 따른 소용돌이 강도는 지수적(exponential)으로 쇠퇴하고, 쇠퇴계수 역시 소용돌이 강도에 비례한다고 보고했다.

이상과 같은 격자난류와 소용돌이 난류유동에 관한 연구는 서로 분리된 상태로 진행되어 왔었다.

따라서 그 자체로는 많은 성과와 발전을 가져왔지만 3차원 유동구조로서의 완전한 난류유동구조에 대한 해석은 거의 성과가 없었던 실정이었다. 그러나 최근에 Jacquin 등⁽¹⁷⁾이 원형직선관에서 격자난류와 소용돌이 유동이 혼합된 유동장에서의 난류특성에 관한 보고를 통해, 격자난류에 작용하는 소용돌이 유동성분은 주로 반경방향의 난류성분에 영향을 미친다는 것을 PSD(power spectral density) 함수를 이용해서 밝혀냈고, 또 난류 운동에너지의 쇠퇴는 소용돌이 성분이 있음으로 해서 더욱 지연된다는 결과를 얻어냈다. 그러나 Jacquin 등은 소용돌이 유동성분이 난류유동에 끼치는 영향을 관찰할 때, 원형직선관의 내부유동에 한정해서 결과를 제시하였으며, 축방향의 난류성분과 반경방향의 난류성분만을 해석함으로써 소용돌이 성분이 반경방향 난류성분에 주로 영향을 끼친다고 보고하였지만, 오히려 소용돌이 성분의 증가에 따라 직접적으로 영향을 받을 것으로 기대되는 원주방향의 난류성분을 간과하였다. 따라서 격자난류에 소용돌이 유동이 혼합된 난류유동에 대한 보다 많은 자료를 얻어야 할 필요성을 가지게 된다.

따라서 본 연구에서는 격자난류에 소용돌이 유동이 혼합된 관유동에서 반경방향과 중심축을 따른 난류유동특성에 대하여 살펴보고, 종전의 결과들과 비교 검토하며, 이를 토대로 소용돌이 성분이 수반된 유동이 관내부 뿐만 아니라 수축부나 자유분사류에 어떠한 영향을 끼치는지를 살펴보고자, 내부 유동장과 수축부 그리고 자유분사류로 이어지는 축대칭유동장의 중심축을 따라서 변하는 난류유동 특성을 실험적으로 분석하였다.

2. 장치 및 방법

유동발생장치는 기본적으로 원심식 송풍기, 유동전개부(settling chamber), 1차 수축부, 소용돌이유동 발생장치 및 2차 수축부로 이루어져 있다. 원심식 송풍기는 8개의 익형 깃을 갖고 5마력 AC 모터에 의해 구동되며, 0~2000 rpm을 조절할 수 있는 속도조절기에 의해 유량을 조절할 수 있도록 했다.

원심송풍기에 의해 발생된 유동은 유동전개부를 지나면서 비교적 안정된 유동으로 바뀌게 되고, 유동전개부를 지난 유동은 수축부 출구직경이 11 cm 이고 13 : 1의 단면 수축비를 가진 Morel 방식의 1

차 수축부를 지나서 소용돌이 유동발생장치로 들어가게 된다. 비교적 균일하고 안정된 유동은 벌집부와 격자로 구성된 소용돌이 유동발생장치를 지나면서, 회전하는 벌집부에 의한 소용돌이 성분과 격자난류유동이 혼합된 3차원 난류유동을 발생시키고, 이렇게 발생한 3차원 난류성분은 0.41 m (약 16 mesh) 하류에서 종횡비(L/D)가 1.2, 단면 수축비가 9 : 1이고 출구직경이 3.67 cm인 Morel방식의 2차 수축부를 지나서 자유분사류로 분사되게 된다.

소용돌이 유동발생장치는 직경 4 mm, 길이 10 cm의 빨대로 구성된 벌집부와 그것의 10 cm 후방에 직경이 6 mm이고 메쉬(mesh) 길이가 2.54 cm인 정방형의 biplane-격자(solidity $\sigma=0.42$)로 구성된 일체의 구조물이 주유동축을 중심으로 회전할 수 있도록 제작하였다. 회전구동장치는 1마력 용량의 DC 모터를 V-벨트로 연결시켜, 속도조절기에 연결하여 회전수를 변화시킬 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 소용돌이 유동발생장치의 회전수 N을 0, 200, 300, 400, 500 rpm (ω : 0, 21.0, 31.4, 42.0, 52.4 rad/s)으로 선정하여 3차원 난류유동을 발생시켰다.

실험의 측정영역은 먼저 소용돌이 발생장치의 후방에 길이 85 cm(33.5 M)의 직선관만을 부착한 후, 격자의 하류 10메쉬~30메쉬영역에서 직선관의

중심축을 따라서, 그리고 10메쉬, 20메쉬, 30메쉬 각각의 영역에서 반지름 방향을 따라서의 유동특성을 측정하여 이전의 결과와 비교하였다. 또 수축부와 자유분사류에서의 유동특성을 살펴보기위해 소용돌이 발생장치의 41 cm(16 M) 후방에 수축부를 장치한 후, 소용돌이 발생장치의 하류 약 6메쉬(-8 D) 지점에서부터 유동장의 중심축을 따라서 변화하는 유동특성을 측정하였다. (Fig. 1)

유속을 측정하기 위해서 X형 열선프루브를 사용하였고, 반경방향의 유동성분과 원주방향의 유동성분을 측정하기 위해서 X형 열선프루브를 프루브 축에 대해 90도 회전시킬 수 있도록 하였다. 내부 및 자유분사류에서의 축방향과 반경방향을 따라서의 유동특성을 측정하기 위해서 3차원 마이크로 이송장치로 프루브를 이동시켰다. 열선은 직경 5 μ m에 종횡비(1/d_w)가 240인 텅스텐이며, 각 열선에 의해 감지된 신호는 정온 열선유속계 (CTA: KANO-MAX7000)를 통해 가변증폭기 (KYOWA, DA-360A) 및 저역 통과장치 (low pass filter: KANOMAX1015)를 거쳐 정류되고 이 출력신호를 각각 오실로스코프 (PHILIPS PM 3302)와 FFT 스펙트럼 분석기 (Hewlett-Packard 3562A dynamic signal analyzer)에 병렬로 연결시켜, 유동을 관찰하면서, 동시에 12 bit (화상력 2.2mV)의 A/D 변환기를 통해 출력된 신호를 개인용 컴퓨터에서 통계 처리하였다. 난류유

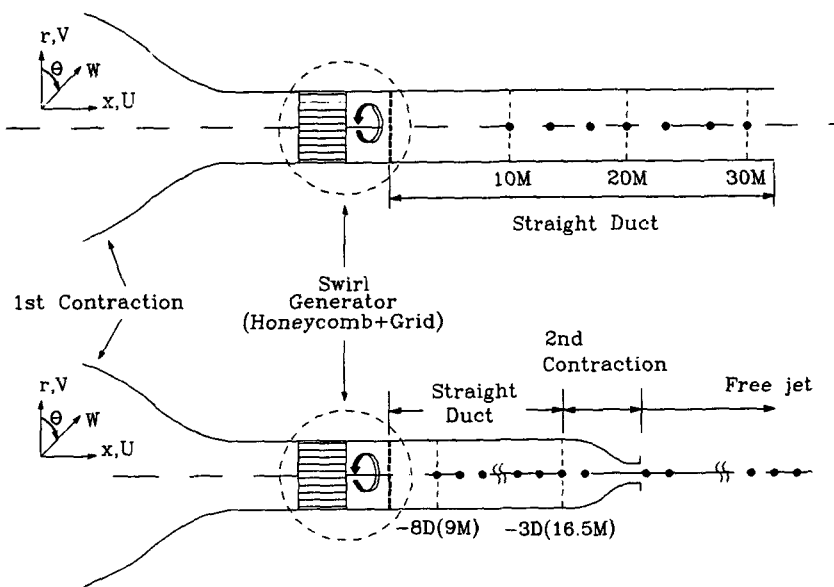


Fig. 1 Flow facility of swirl generator and test section

동성분의 획득을 위한 신호 추출주파수 (sampling frequency)와 저역 통과주파수 (low pass frequency)는 각각 4000Hz와 2000Hz로 선정했고, 이러한 조건에서 2048개의 데이터를 50번 반복, 추출하여 평균속도성분들과 난류속도성분들을 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 관내유동장에서의 유동특성

격자난류에 소용돌이 유동이 혼합된 유동장의 직선관에서의 초기 유동특성과 함께 수축부의 존재유무에 의한 영향을 살펴보기 위해, 수축부가 설치되지 않은 순수 원형직선관에서 소용돌이 유동발생장치의 하류방향 10 M, 20 M, 30 M 지점에서 축방향과 반경방향 속도성분들을 측정하였다.

Fig. 2 (a)~(d), Fig. 3 (a)~(d), Fig. 4 (a)~(d)는 격자 하류의 각 지점에서 반경방향을 따라서 측정된 평균속도와 난류강도성분들을 나타내고 있다. 여기서, U_c 는 각 지점의 중심에서의 평균속도를 나타낸다. 먼저 평균속도의 분포에서 축방향의 평균속도(U/U_c)는 각 영역에서 일반적인 모습을 가

지고, 소용돌이 성분의 존재유무에 별다른 변화를 보여주지 않고 있다. 원주방향의 평균속도(W/U_c)는 소용돌이 발생장치의 회전수를 증가시킴에 따라 크기는 비교적 작지만 속도분포는 비교적 잘 만족하고 있고, 하류방향으로 진행하면서 원주방향으로의 마찰 손실에 의해 그 크기가 상대적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 측정된 평균속도성분을 이용해서 레이놀즈수($Re_m = UM/\nu$)와 소용돌이 발생장치의 회전수 증가에 따른 소용돌이 강도($\Omega = 2\pi \int_0^R UWr^2 dr / \pi R^3 U_m^2$)를 소용돌이 발생장치의 10 M 하류에서 계산해 보았다. 그때의 레이놀즈수는 약 2.4×10^4 이었고, 소용돌이 발생장치의 회전수가 200, 300, 500 rpm일 때의 소용돌이 강도는 0.029, 0.044, 0.066으로 비교적 작은 값으로 나타났다. 여기서, U 는 축방향 평균속도, W 는 원주방향의 평균속도, U_m 은 혼합평균속도 (bulk velocity), r 은 반경방향의 거리, R 은 관의 반경을 나타낸다.

소용돌이 유동이 없을 때의 난류강도는, 하류방향으로 나아가면서 비교적 균질해지는 경향을 가지는 것을 알 수 있긴 하지만, 30 M 영역의 경우는

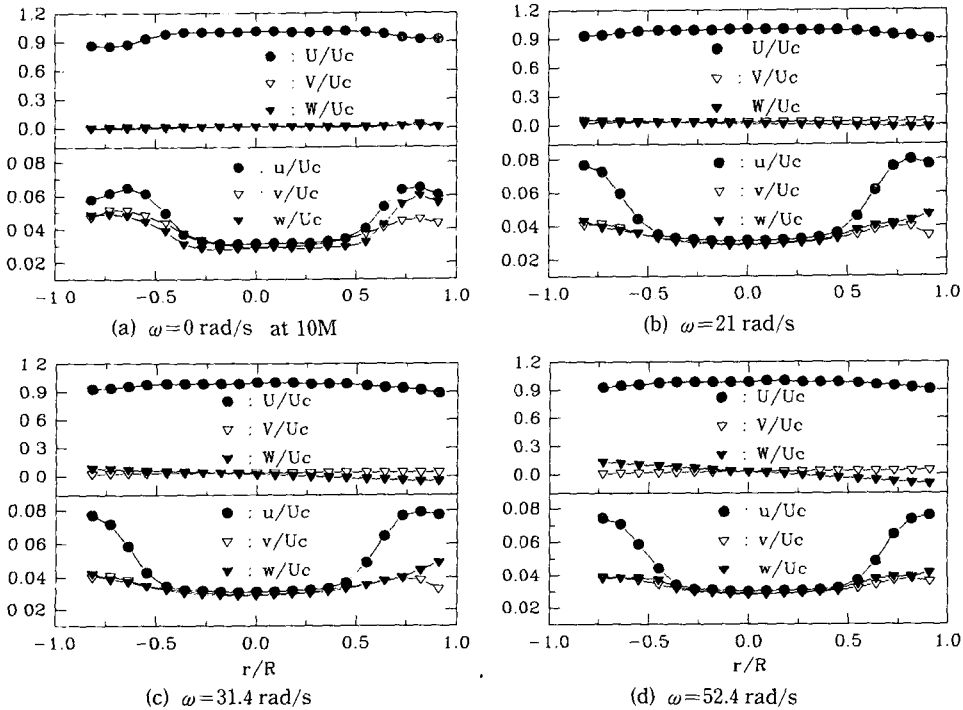


Fig. 2 Mean and turbulent intensities profiles at 10M downstream from swirl generator in internal duct, for variable revolution speed of swirl generator

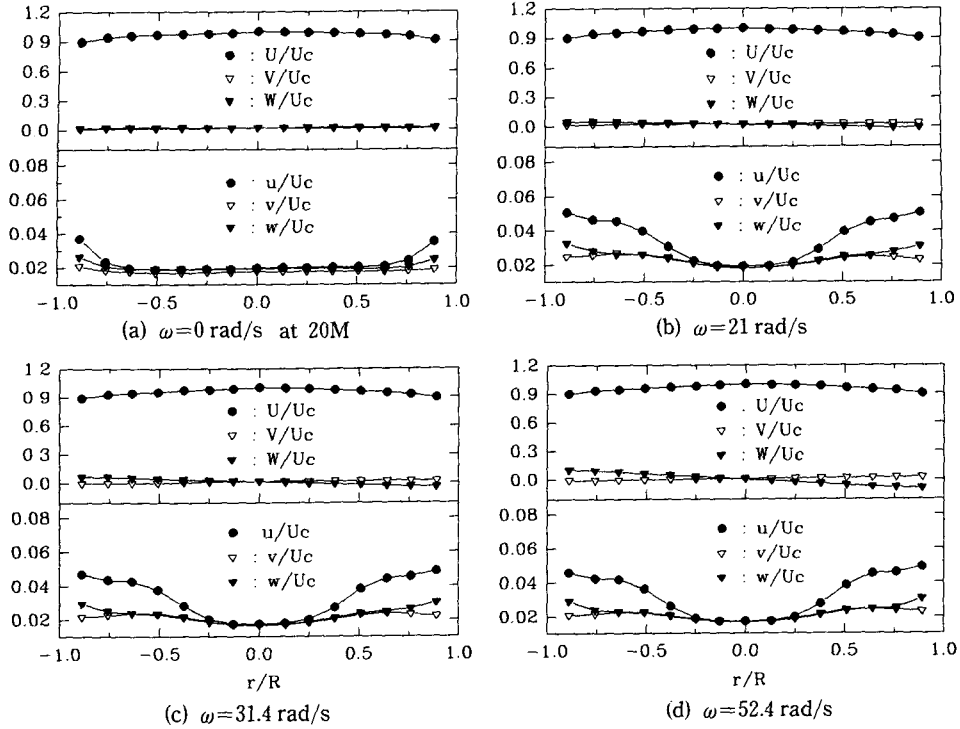


Fig. 3 Mean and turbulent intensities profiles at 20M downstream from swirl generator in internal duct, for variable revolution speed of swirl generator

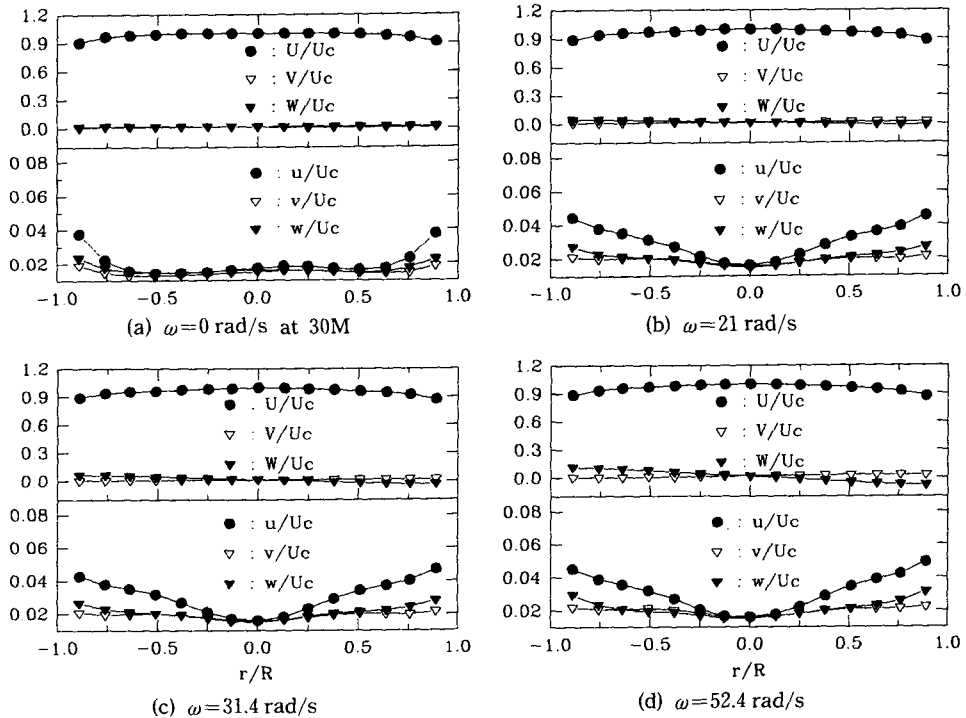


Fig. 4 Mean and turbulent intensities profiles at 30 M downstream from swirl generator in internal duct, for variable revolution speed of swirl generator

20 M 영역에 비해 덜 균질한 것으로 나타남으로 현재의 측정영역이 균질난류발생영역이라고 엄격하게 규정짓는 것은 무리일 것 같다. 이것은 격자난류의 경우 일반적으로 등방성 균질난류가 발생하는 영역은 관내유동의 경우 격자의 하류 40 M, 혹은 50 M 이후의 후방에서 발생한다라고 알려져 있는 사실과 어느 정도 연관성을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 현재 측정된 내부 직선관의 유동영역에서 축방향 난류성분의 변화에 대한 완전한 결론을 내릴 수는 없을 것 같고, 다만 현재의 각 영역에서 소용돌이 유동성분이 있을 때와 없을 때의 변화를 살펴보고, 난류유동 전개구간에서 유동특성과 그때의 소용돌이 성분이 난류유동에 미치는 영향을 조사해보는데 의미를 부여하고자 한다.

소용돌이 성분의 존재유무에 상관없이 전체적으로 축방향 난류강도가 다른 두 난류성분에 비해 우세한 것을 알 수 있고, 소용돌이 성분이 없을 경우에 비해 소용돌이 성분이 있을 경우에 난류강도의 크기가 전반적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 격자에 가장 근접해 있는 영역인 10 M 영역에서 소용돌이 성분이 있음으로 해서 더 균질한 난류

유동이 생성된 것으로 나타났다. 이것은 10 M의 영역이 격자에 너무 근접해 있음으로 해서 생성된 불균질한 격자난류에 소용돌이 유동이 부가됨으로 말미암아 유동을 안정화시켜서 오히려 균질난류로의 변화를 촉진한 것이 아닌가 생각된다. 하지만 이러한 경향은 20 M나 30 M영역에서는 반영되지 않고 오히려 소용돌이 유동이 부가됨으로 말미암아 균질성이 감소되고 있다. 따라서 이러한 경향을 단정해서 이야기 할 수는 없지만, 난류유동 발달구간의 어느 특정한 영역에서는 소용돌이 유동성분이 가미됨으로 말미암아 더 일찍 균질난류로의 전환이 이루어지지 않을까 하는 의문을 갖게되고, 이것은 향후 연구과제로 고려해보게 하는 요인이 된다고 생각한다.

또, 내부 직선관의 중심을 따라서 소용돌이 성분이 작용할 때의 난류유동 특성을 살펴보기 위해 소용돌이 발생장치의 하류 약 10 M지점에서부터 30 M지점까지 유동장의 중심축을 따라서 난류유동의 변화과정을 살펴보았다. Fig. 5 (a)~(d)에 나타나 있는 바와 같이 소용돌이 성분이 없을 때는 난류성분의 분포가 하류로 나아가면서 상대적인 크기를

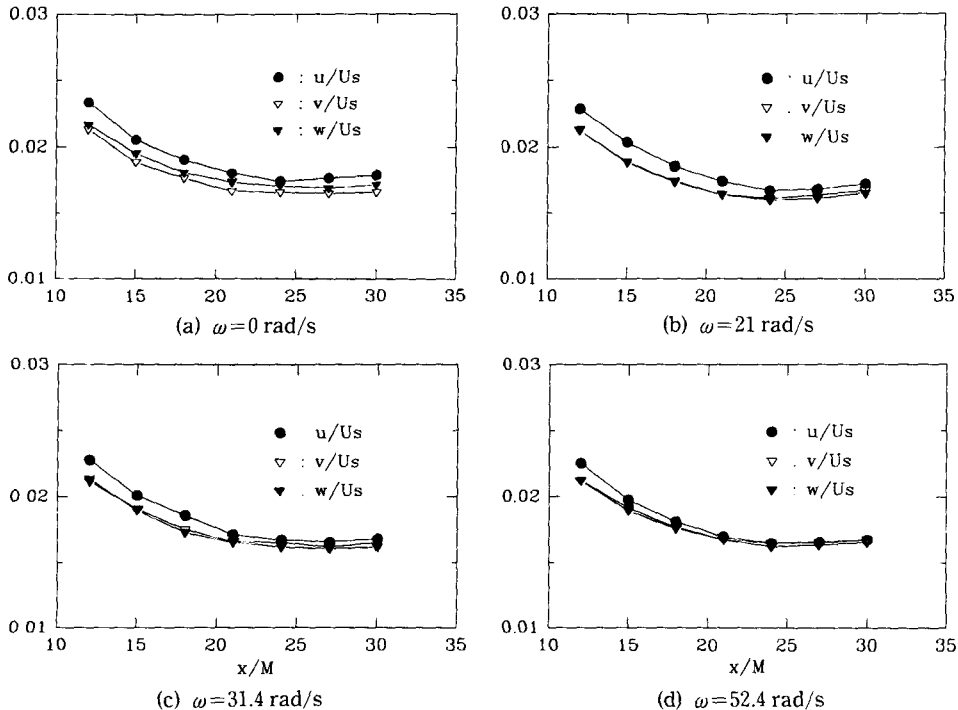


Fig. 5 Distributions of turbulent intensities along the centre-line in internal duct, for variable revolution speed of swirl generator

계속 유지하고 있는 반면에 소용돌이 성분의 크기가 증가함에 따라 축방향의 난류강도에 비해 반경방향과 원주방향의 난류강도의 상대적인 감소가 적어짐으로 말미암아 그 크기가 거의 같아지는 등방성 난류 형태를 가지게 되는 것을 관찰할 수 있다. 여기서, U_s 는 직선관의 초기지점, 즉 12 M영역의 중심평균속도를 나타낸다. 이것으로부터 소용돌이 성분은 국소적이긴 하지만 난류유동을 더 균질하고, 등방성화된 난류로 전환시키는 역할을 하고 있다고 할 수 있겠다.

3.2 중심축에 따른 난류유동 특성

관내유동에서 수축부 그리고 자유분사류로 이어지는 확대칭 유동장의 중심축을 따라서, 소용돌이 유동성분이 있을 때의 유동특성을 측정하였다. Fig. 6 (a)~(d), Fig. 7 (a)~(d) 그리고 Fig. 8 (a)~(d)에는 수축부가 있는 내부유동과 자유분사류에서의 난류속도성분의 변화를 보여주고 있다. 여기서 U_0 는 수축부 출구지점에서의 평균속도를 나타낸다. 먼저 수축부가 있는 내부유동의 경우, 소용돌이 유동성분이 있을 때나 없을 때 공히 격자와 소용돌이 성

분에 의해 발생된 난류유동이 수축부를 지나면서, 수축부의 영향에 의해 수축부의 입구지점(-3d : 16.5 M)에서 축방향 난류강도와 반경방향 난류강도 및 원주방향의 난류강도가 서로 교차하는 vortex stretching이 일어나는 것을 볼 수 있다. 또, 수축부의 입구 전단부에서 단순 격자난류의 경우에 축방향 난류성분의 크기가 다른 두 난류성분들보다 크게 나타나는 일반적인 경향이 소용돌이 성분이 있음으로 해서 깨어지고 있음을 볼 수 있다. (Fig. 6) 즉, 소용돌이 성분이 증가할수록 수축부의 입구 근처에서부터 상류방향으로 가면서 서서히 축방향의 난류성분보다 반경방향의 난류성분과 원주방향의 난류성분이 우세해지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 3.1에서도 이미 언급한 바와 같이 소용돌이 성분이 유동장의 국소영역, 특히 유동장의 중심부에서 비등방성 난류유동을 등방성 난류유동으로 빠르게 촉진시킨다는 것을 확인시켜주고 있다. 이와 같은 등방성의 촉진은 축방향의 난류성분보다는 반경방향과 원주방향의 난류성분에 더 큰 영향을 끼친 결과로서, Jacquin 등⁽¹⁹⁾의 결과와 좋은 일치를 보이긴 하지만 Jacquin 등⁽¹⁹⁾이 소용돌이 성분은

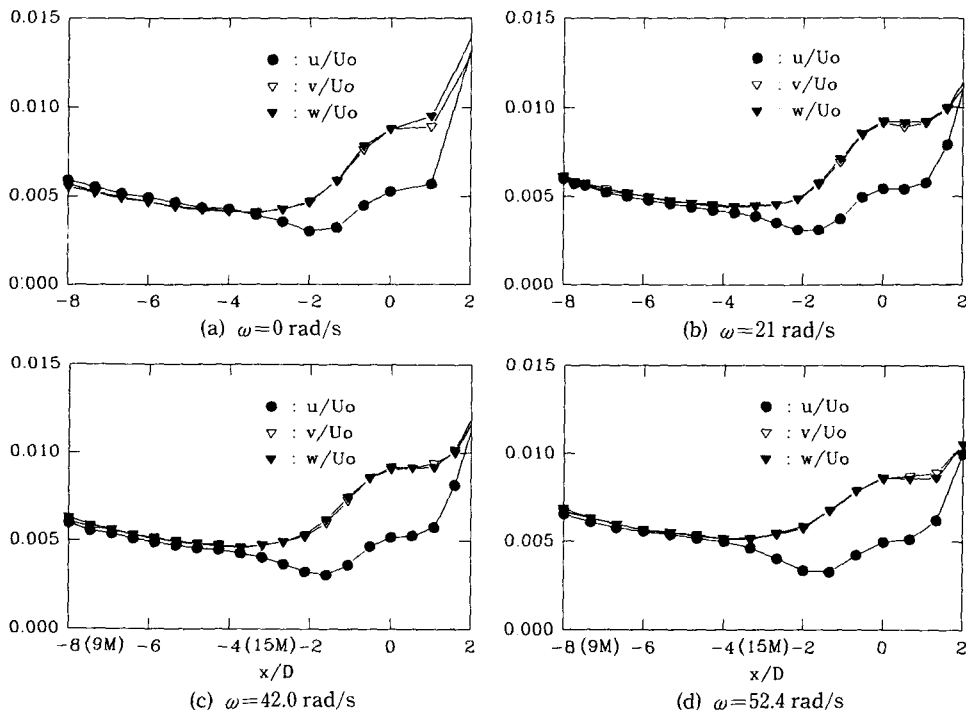


Fig. 6 Distributions of turbulent intensities along the centre-line in internal flow region with the contraction, for variable revolution speed of swirl generator

반경방향의 난류성분에 더 큰 영향을 미친다고 보고한 것에 비해서, 소용돌이 성분은 반경방향의 난류성분뿐만 아니라 원주방향의 난류성분에도 주된 영향을 끼친다는 좀더 보완된 결과를 보여주고 있다. 또한 이 결과는 Fig. 7(a)~(c)에 나타나 있는 수축부내에서의 난류유동의 변화를 살펴보면 더욱 명백해진다. 왜냐하면 수축부 내부에서 축방향의 난류성분은 소용돌이 성분이 있을 때나 없을 때, 또 소용돌이 성분 발생장치의 회전수가 증가하는 것에 상관없이 거의 일정한데 비해, 반경방향과 원주방향의 난류성분은 소용돌이 성분의 크기에 비례해서 증가하는 것을 볼 수 있기 때문이다.

특히 Fig. 7(d)는 수축부의 중심축을 따라서 측정 한 난류운동에너지의 분포를 소용돌이 크기의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수축부에서는 난류운동에너지의 크기가 소용돌이 성분의 크기에 비례해서 증가하는 것을 관찰할 수가 있다. 3.1절에 이미 제시한 결과와 3.3절에서 제시된 결과를 살펴보면 분명히 알 수 있겠지만, 수축부가 없는 직선관의 경우와 자유분사류의 하류영역에서

는 난류강도의 크기나 난류운동에너지의 크기는 오히려 소용돌이 성분이 있을 때 적게 나타난다. 반면에, 수축부에서는 난류강도의 크기나 난류운동에너지의 크기가 소용돌이 성분에 비례해서 증가하는 것을 살펴볼 수가 있는데, 이것은 차후 수축부와 소용돌이 성분사이의 특별한 상관관계를 규명할 필요성을 느끼게 된다.

Fig. 8에 자유분사류에서의 난류유동성분의 변화를 나타내었다. 수축부내에서 반경방향과 원주방향의 난류강도에 비해 적었던 축방향의 난류강도가, 분사류의 전단경계층의 영향을 받는 반경방향과 원주방향의 난류강도에 비해 크게 확산되고 팽창되어 난류강도의 크기가 교차하는 전형적인 모습이 소용돌이 성분이 있을 때나 없을 때나 똑같이 나타나고 있다. 그러나 소용돌이성분의 유무에 따른 난류강도의 변화에 있어서는 별다른 특이점을 찾아 볼 수 없이 거의 유사한 형태를 유지하고 있고, 난류성분은 수축부 출구직경의 약 10D 지점까지 꾸준히 확산되었다가 10D 이후부터 서서히 쇠퇴하고 있는 것을 볼 수 있다.

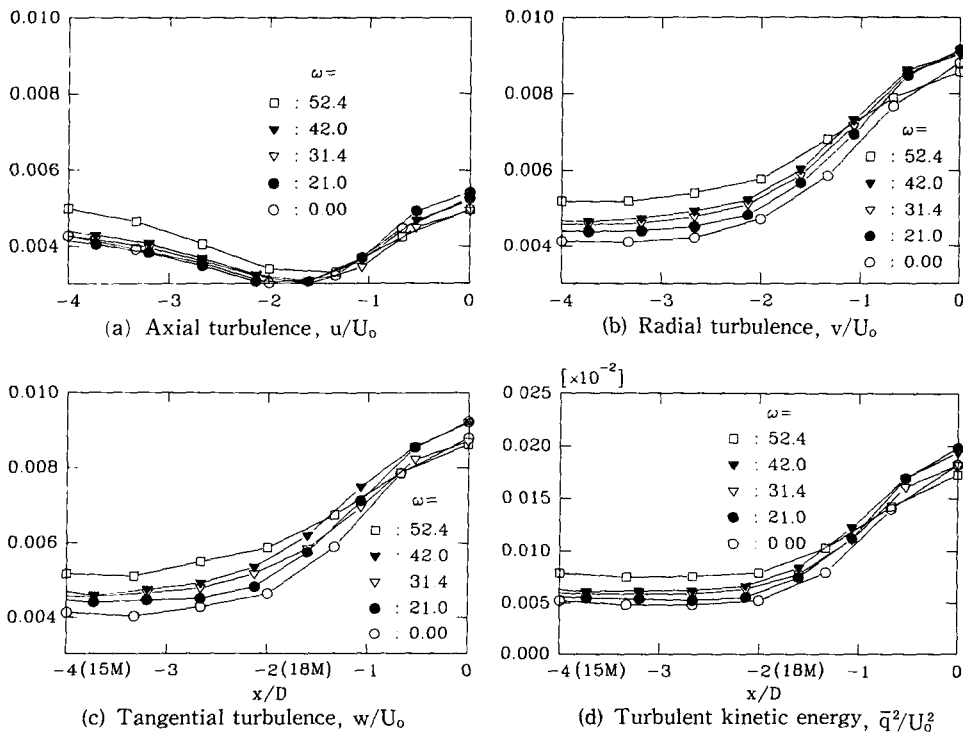


Fig. 7 Effect of swirling flow on the turbulent intensities and turbulent kinetic energy in the contraction for variable speed of swirl generator

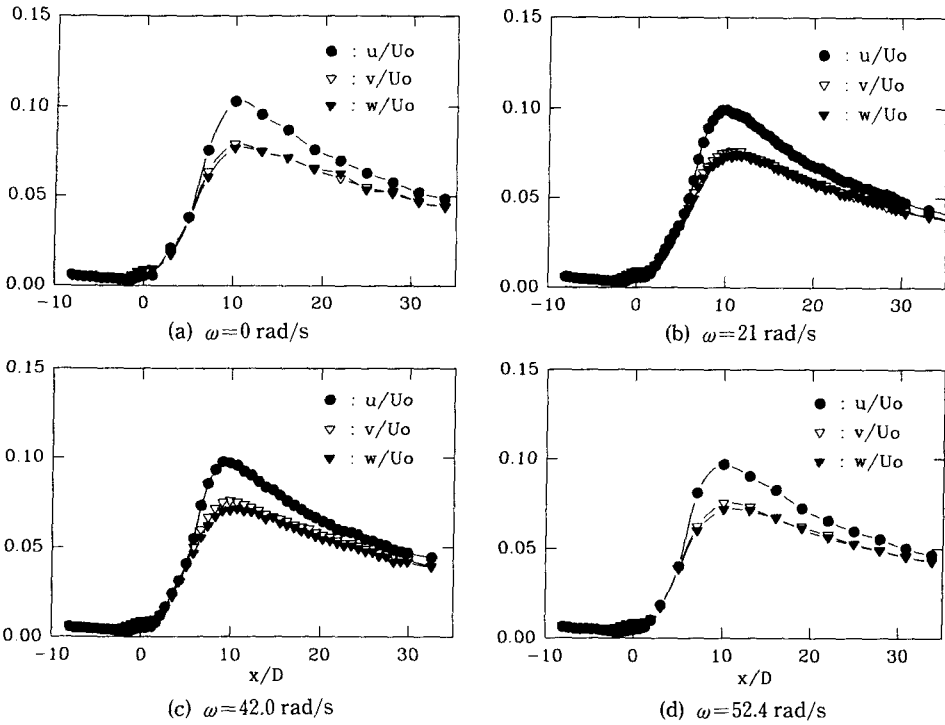


Fig. 8 Distributions of turbulent intensities along the centre-line in free jet for variable revolution speed of swirl generator

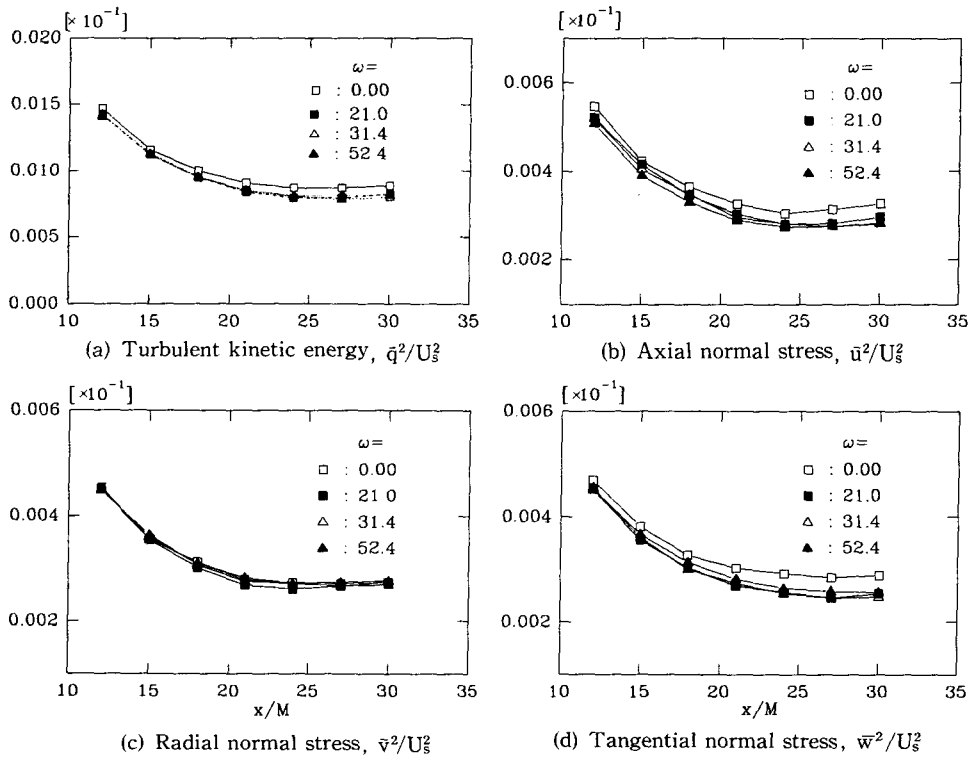


Fig. 9 Decay of turbulence in internal duct for variable revolution speed of swirl generator

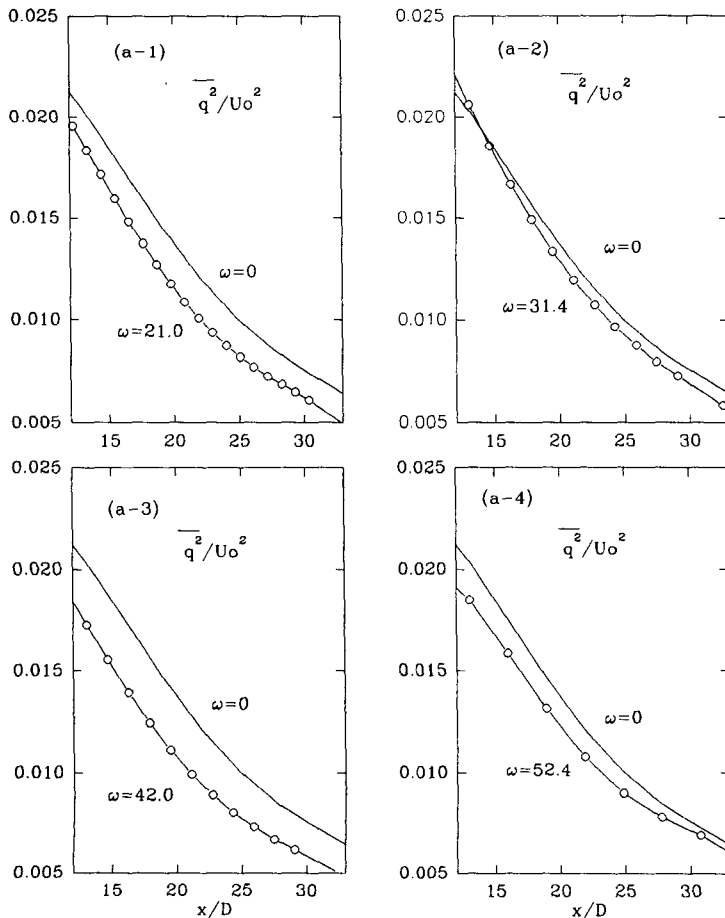
3.3 소용돌이 성분에 의한 난류쇠퇴의 영향

내부유동과 수축부를 통과한 자유분사류의 하류에서 소용돌이 성분이 수반되었을 때와 소용돌이 성분이 수반되지 않았을 때의 난류성분의 쇠퇴와 난류 운동에너지의 쇠퇴를 살펴보고, 소용돌이 성분이 난류쇠퇴에 미치는 영향을 살펴보았다.

수축부가 장착되지 않은 단순 원형직선관의 중심축을 따라서 측정한 난류분포 결과(Fig. 5)를 이용해서 각각의 난류성분과 난류운동에너지 쇠퇴의 경향을 Fig. 9(a)~(d)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 내부직선관의 경우, 수축부가 있는 경우와는 대조적으로 소용돌이 성분이 있을 때가 소용돌이 성분이 없을 경우보다 크기도 전반적으로 작게 나타나고, 난류쇠퇴는 오히려 더 빨라지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 Jacquin 등⁽¹⁹⁾이 최근에 발표한 결과와는 상반된 결과로서 상당한 의문을

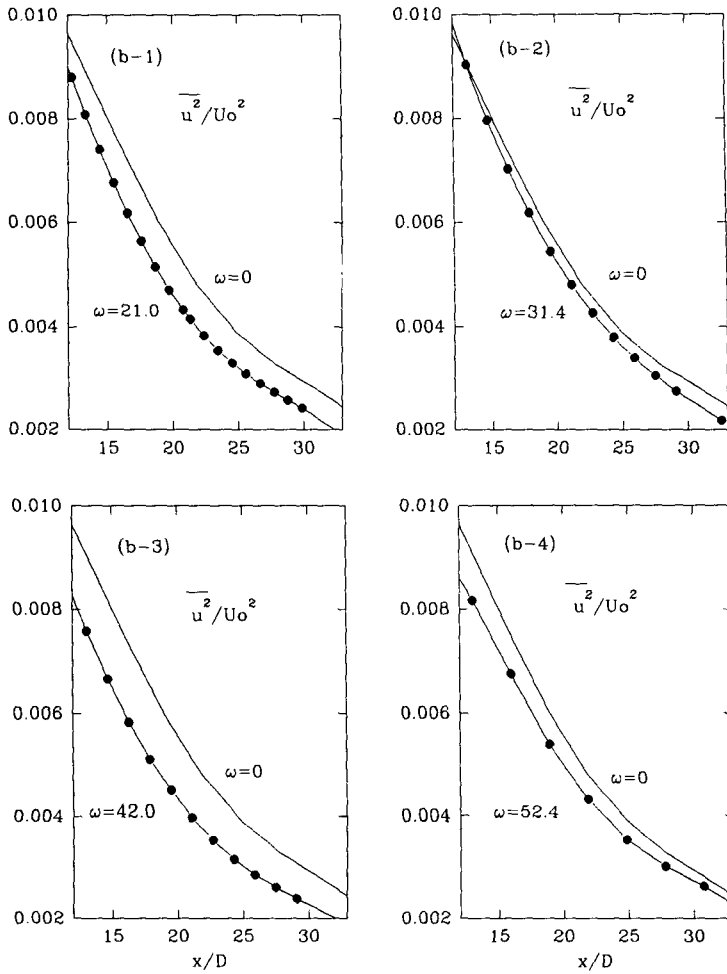
제시하게끔 하는데, 아마도 이것은 Tan-atchat 등⁽¹⁸⁾이 언급했던 바와같이, 본 실험에서 행했던 내부직선관의 실험영역이 격자면에서 충분히 떨어지지 않은 구간, 즉 난류유동이 완전히 발달되지 않은 초기 전개구간이기 때문인 것과, 주유동에 비해 소용돌이 성분의 크기가 상대적으로 미약했기 때문(Jacquin 등의 연구에서는 소용돌이 강도 $\Omega \approx 4$, 본 연구에서의 소용돌이강도는 약 0.03~0.07)인 것으로 판단된다. 다만, 소용돌이 성분만 있을 경우에 대해 비교해보면, 소용돌이 성분이 증가함에 따라 난류 운동에너지와 각 난류성분(특히 반지름 방향의 난류성분)의 쇠퇴가 조금씩 지연되고 있는 것을 살펴볼 수 있고, 이것은 Jacquin 등⁽¹⁹⁾의 결과와 잘 일치하고 있다.

또한 자유분사류의 하류(수축부 출구직경의 12D 하류)에서 소용돌이 성분이 난류쇠퇴에 끼치는 영



(a) Turbulent kinetic energy

Fig. 10 (continued)



(b) Axial normal stress

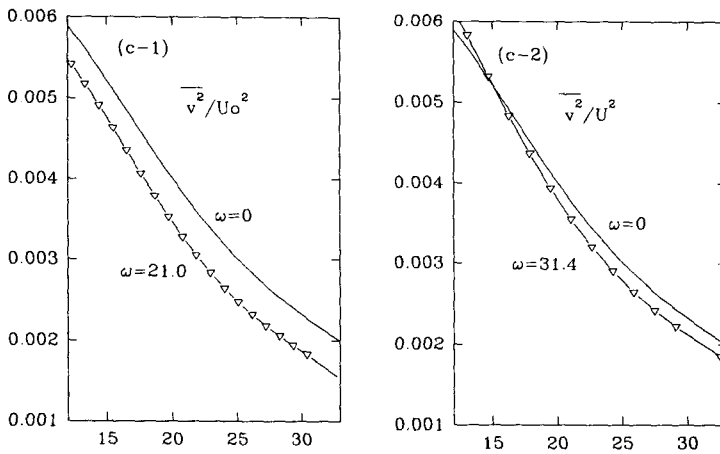
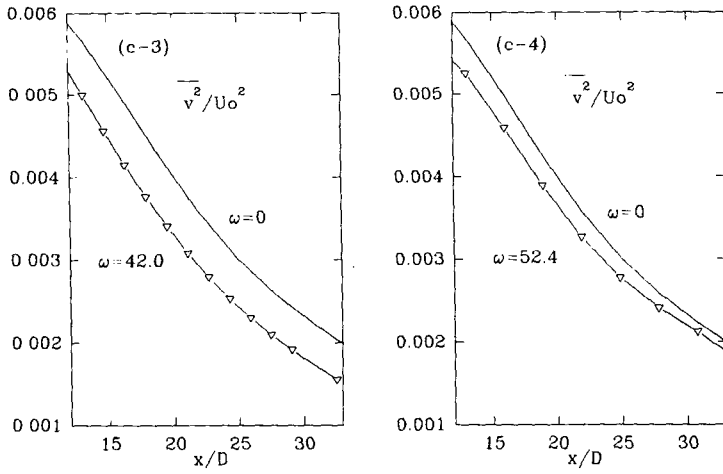
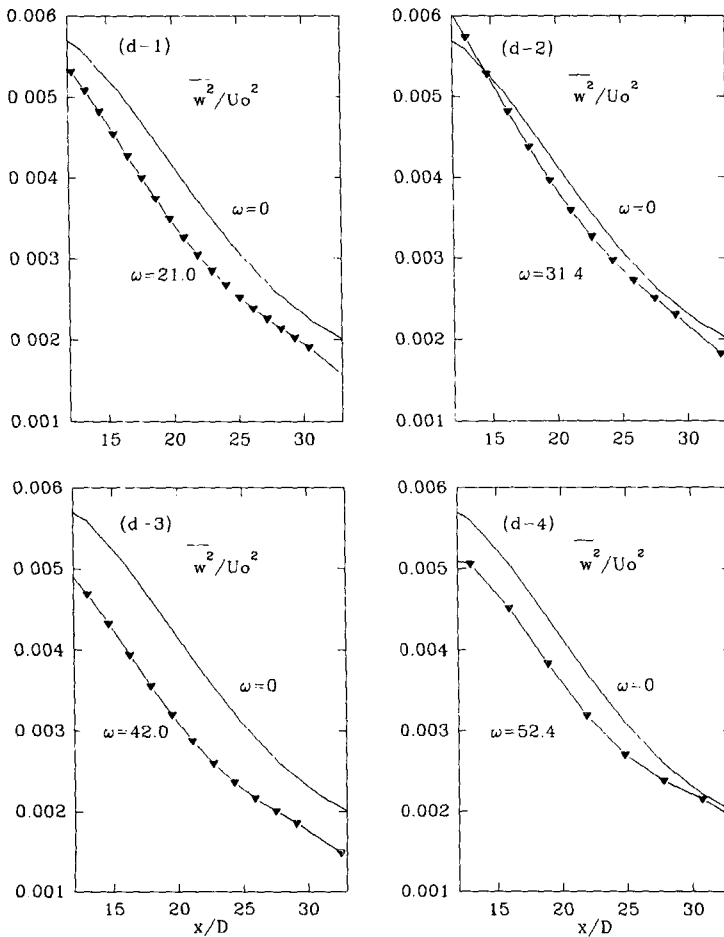


Fig. 10 (continued)



(c) Radial normal stress



(d) Tangential normal stress

Fig. 10 Decay of turbulence in free jet, for variable revolution speed of swirl generator

향을 살펴보았다. Fig. 10(a)~(d)는 각각의 난류속도와 난류 운동에너지의 결과를 나란히 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 난류 운동에너지의 크기나 난류 수직응력(normal stress)의 크기는 소용돌이 성분이 없을 경우보다 전반적으로 적은 값을 가지고, 쇠퇴경향에 있어서는 소용돌이 성분이 없는 것과는 절대적인 비교를 할 수는 없지만, 소용돌이 성분이 있는 경우에 대해서는 소용돌이 성분의 증가에 따라 난류쇠퇴가 지연되고 있음을 알 수 있다. 또한 자유분사류의 난류쇠퇴영역에서, 난류운동에너지 쇠퇴법칙을 만족하는지를 살펴보기 위해 $\overline{q^2}/\overline{U_0} = \alpha(x/M - x_0/M)^{-n}$ 식을 이용하여 쇠퇴율 n 을 찾아보았다. Fig. 11에 나타난 바와같이 소용돌이 성분이 있을 때도 쇠퇴율의 범위가 1.208 ~ 1.388로 일반적으로 알려진 쇠퇴율 1.3 근처의 값으로서 비교적 쇠퇴율이 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 소용돌이 성분의 증가에 따라 쇠퇴율 n 이 감소하고 있음을 보아 소용돌이 성분의 증가가 난류 에너지쇠퇴를 지연시키고 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

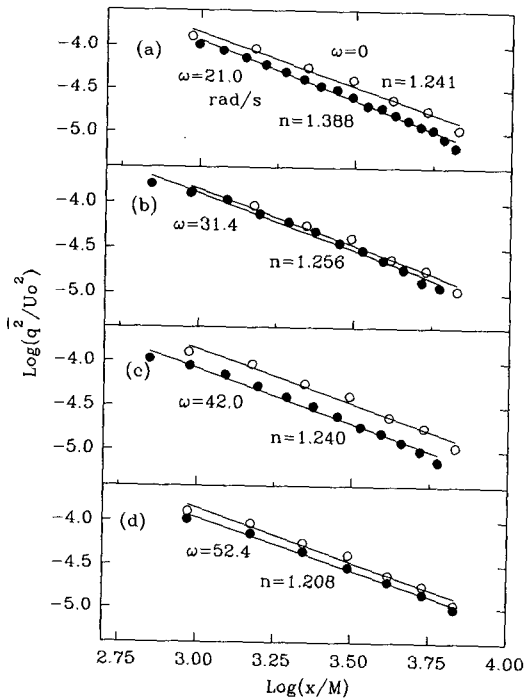


Fig. 11 Power laws of decay of turbulent kinetic energy in free jet, for variable revolution speed of swirl generator

4. 결 론

관내유동과 수축부 및 자유분사류로 이어지는 축대칭 유동장의 중심축을 따라서, 소용돌이 성분의 존재유무와 또 소용돌이 성분의 증가에 따른 난류 유동특성을 살펴보았다. 관내유동의 경우 메쉬크기에 대한 레이놀즈 수가 2.4×10^4 이고, 자유분사류의 경우에 수축부의 출구직경에 대한 레이놀즈 수가 7.5×10^4 인 유동조건에서, 소용돌이 강도를 0.03 ~ 0.07 사이의 비교적 약한 소용돌이 발생영역에서, X-형 열선풍속계를 이용해서 유동량을 측정하여 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

첫째, 내부유동의 경우 소용돌이 유동성분은 소용돌이 성분이 없는 경우와 비교해서 난류유동을 국소적으로 등방성화시키는 역할을 하고, 이는 소용돌이 성분이 축방향의 난류성분 보다 반경방향의 난류성분과 원주방향의 난류성분에 주로 영향을 끼치기 때문인 것으로 나타났다.

둘째, 수축부에서의 난류 운동에너지의 크기는 소용돌이 성분이 있음으로써 크게 증가하였고, 이것은 수축부와 소용돌이 성분간의 상관관계에 대한 명확한 규명을 해야 할 필요성을 제시하고 있다.

셋째, 자유분사류의 난류쇠퇴구간에서 난류쇠퇴와 난류 운동에너지의 쇠퇴를 살펴보면 소용돌이 성분이 있을 경우에도 난류 쇠퇴법칙을 만족하고 있고, 소용돌이 성분의 증가에 따라 난류쇠퇴가 지연되는 것으로 나타났다. 더구나 소용돌이 유동발생장치에 의한 소용돌이 강도가 전반적으로 미약했던 점을 고려하면 소용돌이 성분이 난류쇠퇴를 지연시키는 영향은 더욱 확실하고, 강하리라고 생각된다.

후 기

본 연구는 첨단유체공학센터(AFERC)의 일부 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Taylor, G. I., 1935, "Statistical Theory of Turbulence," *Proc. Roy. Soc. A*, 151.

- (2) Batchelor, G. K. and Townsend, A. A., 1947, "Decay of Vorticity in Isotropic Turbulence," *Proc. Roy. Soc. A*, 190, 534.
- (3) Batchelor, G. K. and Townsend, A. A., 1948, "Decay of Isotropic Turbulence in the Initial Period," *Proc. Roy. Soc. A*, 193, 539.
- (4) Batchelor, G. K., 1953, "The Theory of Homogeneous Turbulence," Cambridge University Press.
- (5) Uberoi, M. S., 1956, "The Effect of Wind Tunnel Contraction on Free Stream Turbulence," *Journal of Aero. Sci.* 23, 754.
- (6) Uberoi, M. S. and Wallis, S., 1966, "Small Axisymmetric Contraction of Grid Turbulence," *J. Fluid Mech.* Vol. 24, pp. 539~543.
- (7) Comte-Bellot, G. and Corrsin, S., 1965, "The Use of a Contraction to Improve the Isotropy of Grid-Generated Turbulence," *J. Fluid Mech.* Vol. 25, pp. 657~687.
- (8) Corrsin, S., 1963, "Turbulence: Experimental Methods" *Handbook of Phys.* Vol. VIII/2, Springer.
- (9) 한용운, 1988, "수축부에 의한 상류의 난류유동조건 변화," 한국항공우주학회지, 제16권, 제4호, pp. 24~33.
- (10) 한용운, 남경덕, 1992, "상류유동전개부, 수축부 및 자유분사류로 이어지는 유동장에서의 난류에너지 천이에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제12호, pp. 2368~2375.
- (11) Johnston, J. P., Halleen, R.M. and Lezius, D. K., 1972, "Effects of Spanwise Rotation on the Structure of Two-Dimensional Fully Developed Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 56, part 3, pp. 533~537.
- (12) Koyama, H., Masuda, S., Ariga, L. and Watanabe, I., 1979, "Stabilizing and Destabilizing Effects of Coriolis Force on Two-Dimensional Laminar and Turbulent Boundary Layers," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 101, pp. 23~31.
- (13) Ibbetson, A. and Tritton, D. J., 1975, "Experiments on Turbulence in a Rotating Fluid," *J. Fluid Mech.* Vol. 68, Part 4, pp. 839~672.
- (14) Habib, M. A. and Whitelaw, J. H., 1980, "Velocity Characteristics of Confined Coaxial Jets with and without Swirl," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 47~53.
- (15) Cluasen P. D., Koh, S. G. and Wood, D. H., 1993, "Measurements of a Swirling Turbulent Boundary Layer Developing in a Conical Diffuser," *Exp. Thermal fluid Sci.* Vol. 6, pp. 39~48.
- (16) Kitoh, O., 1991, "Experimental Study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe," *J. Fluid Mech.* Vol. 225, pp. 445~479.
- (17) 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.
- (18) Tan-atichat, J., Nagib, H. M. and Loehrke, R. I., 1982, "Interaction of Free-Stream Turbulence with Screen and Grids: a Balance Between Turbulence Scale," *J. Fluid Mech.* Vol. 114, pp. 501~528.