

수축부와 확대부의 중심 유동에서 나타나는 대칭적 난류 구조에 관한 연구

한 용 운* · 이 장 환**

(1997년 9월 2일 접수)

Study on Centerline Turbulent Structures of Circular Contraction and Expansion Ducts

Yong Oun Han and Jang Hwan Lee

Key Words : Circular Contraction(원형축소관), Circular Expansion(원형확대관), Hot Wire Anemometry(열선풍속계), Centerline Turbulence(중심선 난류), TKE Budgets (난류 운동에너지 분배)

Abstract

In order to look into the comparative flow characteristics between a circular contraction duct and a circular expansion duct the both centerline turbulent structures have been investigated by the hot wire anemometry. Both of the contraction and the expansion have Morel type contours. Means, turbulences, and triple moments have been measured for the turbulent kinetic energy budgets along their centerlines. It is resulted that mean velocities of both have much deviated from theoretical values calculated by one-dimensional continuity considerations, and that for the same upstream condition, the expansion maintains the isotropy in general while the contraction maintains a severe anisotropy through the whole duct. The mean transport of the TKE along the expansion is willing to balance mostly with the dissipation in the TKE budgets while that along the contraction is balanced with the production in the turbulent kinetic energy equation.

1. 서 론

수축관이나 확대관은 복합관로, 유량 계측 장비, 풍동 등에 응용되어 단면 변화에 따른 내부 유동의 특성이 매우 예민하게 변화되고 대부분 폐쇄된 유동 체계로서 그 유동 구조를 이해하기 위해서는 비접촉식 분석 방법이 요구되어 해석이 어렵게 된다. 기하학적으로 상반된 대칭적 내부 구조를 갖는 두 유로의 특징은 가속 장치와 감속 장치로 사용될 뿐

만 아니라, 압력의 가감속 방식으로도 활용되어 내부의 운동에너지 편중 현상을 줄일 수 있는 완충 장치로서 활용되므로 내부 유동 구조에 대한 정확한 이해는 유체 수송의 효율성을 증가시킬 수 있는 방법으로 사용될 수 있다.

관내 유동은 외부 유동에 비하여 과도한 난류의 발생이 억제되지만 비교적 경계면에 대하여 자유스런 중심을 따라서는 여전히 난류의 운동이 활발하다. 따라서, 축 대칭 형태의 관내 유동에서는 중심축을 따라서 난류 구조의 천이 과정을 분석해 봄으로서 단면 변화에 따른 유동 상태를 일목요연하게 관찰할 수 있어 유체 수송의 효율성을 검증하는 것

*회원, 영남대학교 기계공학부

**회원, 영남전문대학 자동차과

에 용이하게 활용될 수 있다. 또한, 축대칭 중심유동은 복잡한 난류 운동에너지 방정식의 형태가 비교적 단순화되어 직접 계측된 난류량들에 의하여 에너지 전환에 대한 분석이 가능해진다. 중심 유동을 분석하여 얻어진 수축부의 유동 특성은 난류 성분들의 증감에 따라서 와도 팽창(Vortex Stretching)이 존재함이 발견되어져 왔으며⁽¹⁻⁴⁾ 최근에 연구된 바에 의하면 확대부에서는 수축부와 상반된 와도 압축(Vortex Compression) 과정이 자연스럽게 존재함이 밝혀진 바 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이들 두 구조물의 대칭적 특성은 난류 운동에너지 방정식의 각 항의 분배(Budget)를 관찰함으로써 구조물의 변경에 따른 정량적인 비교를 가능케 하여 공학적인 측면과 난류 해석 과정에도 유리한 자료를 제공하게 된다.

본 논문에서는 Morel 방식⁽⁸⁾의 내부 곡면을 갖는 축대칭 수축관과 역Morel 방식의 확대관을 이용하여 중심 난류 성분들을 계측하고 그 결과들을 이용한 난류 운동에너지 천이 과정을 비교 분석하여 두 구조물에서 나타난 대칭적 난류 구조의 특성들을 제시하고자 한다.

2. 중심 축에서의 난류 운동에너지 평형

내부 유동 구조의 변화 과정을 쉽게 이해할 수 있는 방법 중의 한가지로서 어떻게 난류 운동에너지(Turbulent Kinetic Energy; TKE)의 구성들이 흐름 구조에 따라 천이해 가는가를 조사해보는 것이다. 특히, 본 연구와 같이 축 대칭의 유동장에서는 중심 축을 따라서 난류 운동에너지 구성이 간단히 표현되므로 난류 구조를 이해하기에 편리하다. 축 대칭 유동장에서의 난류 운동에너지 방정식은 정상 상태의 흐름을 가정할 때, 식 (1)과 같이 얻는다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} U \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} & -A \\ = & -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p'v'}}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \overline{p'u'} + \frac{1}{\rho} \overline{p'v'} \right) & -B \\ & -\left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\overline{q^2} v'}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\overline{q^2} u'}{2} \right) \right\} & -C \\ & + \nu \left\{ 2u' \frac{\partial^2 u'}{\partial x \partial x} - \frac{4}{r^2} \overline{w'w'} + \frac{2}{r^2} \overline{w'v'} - \frac{2}{r^2} \overline{(v')^2} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{2}{r} \ln r \overline{v'w'} - \frac{2}{r^2} (w')^2 - 2 \ln r \overline{(w')^2} \\ & + \left\{ v' \frac{\partial^2 v'}{\partial x \partial x} + w' \frac{\partial^2 w'}{\partial x \partial x} + \frac{2\nu}{r} u' \frac{\partial v'}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad -D$$

$$- \left\{ v'v' \frac{\partial V}{\partial r} + u'u' \frac{\partial U}{\partial x} \right\} \quad -E \quad (1)$$

여기서, $\overline{q^2} = 1/2(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ 로서 정의되는 난류 운동 에너지이며 축 대칭 유동의 중심축에서는 단순한 대칭적 좌표 변환이 이루어짐으로, $\overline{v'^2} \approx \overline{w'^2}$ 가 만족되어 $\overline{q^2} \approx 1/2(\overline{u'^2} + 2\overline{v'^2})$ 로 정의될 수 있다. 위 식에서 A항은 평균 난류 운동 에너지 전달항, B항은 압력과 속도의 상관항, C항은 속도의 3차 상관항으로서 난류 운동 에너지 확산항은 점성 일항을 무시하여 B와 C항들로 표현 될 수 있다. D항은 소산항, E는 생성항이다. 내부 유동에서 나타나는 확산항은 상대적으로 다른 항들에 비해 적은 값을 갖게 되므로 대체적으로 무시되는 경향이 있다.⁽¹⁰⁾ 특히, B항의 압력상관항은 현재의 존재하는 계측 장비로서는 계측이 불가능하여 평가가 어렵다. 따라서, 확산항 중에서 비교적 영향이 큰 3차 상관항은 잔류시키고, D의 소산항을 ε 으로 표기하고 압력 상관항들을 포함한 미세한 크기의 값들을 잔류항, $O(\text{residual})$ 로 표현하여 중심을 따라서 축약된 방정식으로 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} U \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} = & -\left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\overline{q^2} v'}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\overline{q^2} u'}{2} \right) \right\} \\ & - \left\{ v'v' \frac{\partial V}{\partial r} + u'u' \frac{\partial U}{\partial x} \right\} \\ & - \varepsilon + O(\text{residual}) \end{aligned} \quad (2)$$

과 같이 표현된다. 확산항에서 첫번째항은 계측이 불가능하지만 중심에서 분자가 0이 되는 근사적 가정을 적용하여 무시하며 또한 생성항은 중심축에서의 L'hospital의 정리와 연속 정리를 이용하여 바꾸고 중심축에서 계측이 가능한 확산항들로만 제한하여 위 식을 표현할 때, 근사식을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} U \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial x} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\overline{q^2} u'}{2} \right) - (\overline{u'u'} - \overline{v'v'}) \frac{\partial U}{\partial x} \\ & - \varepsilon + O(\text{residual}) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 위 식의 모든 항은 ε 와 잔류항을 제외하고는 직접 측정이 가능하다. 본 연구의 범위로서는 위 식에서 직접 측정이 가능한 항들에 의한 평

형식을 기초로 하여 마지막으로 잔류항을 무시한 평형 방정식에 의한 ε 을 평가하여 난류 운동 에너지 방정식의 대표적 항들에 의해서 구성되는 개략적인 에너지 분배(Budgets)⁽¹⁰⁾ 과정을 추적하고자 한다. 이러한 과정은 다소 Rough한 평가가 되겠지만 내부 유동의 확산항 자체가 미세하다는 사실에 기초하여 볼 때, 개괄적인 난류 구조를 이해하는 면에서는 의미가 있다고 본다. 한편, 차후에 모델링에 의거하여 위의 평형에 대한 보안을 한다면 측정된 항들을 기초로한 Reynolds Stress Model에 의하여 압력 상관항을 평가하였을 때, 소산항 ε 에 대한 평가가 좀 더 정확해질 것으로 기대된다.

3. 실험조건

3.1 실험 장치 및 계측 장비 구성

수축관과 확대관의 대칭적 특성을 얻기 위하여 두 개의 3차 곡선을 점대칭적으로 이어서 각각의 관중심에서 동일한 기울기를 갖도록 연결한 Morel형식의 내부 곡면을 갖는 두 개의 축대칭 관들을 제작하여 이용했다. 따라서, 확대부는 역 Morel형식의 기하학적 형상을 갖도록 하였다. 작은 직경의 크기를 0.036 m의 크기로 하고 수축부 및 확대부는 면적 대비 9:1이 되도록 하며 알루미늄의 내부를 3차원 축대칭 형상으로 선반 가공했다. 또한, 수축부는 흐름 방향으로 정압력구배의 조건을 갖게 되므로 입구직경에 대한 축길이, L/D를 2.0으로 짧게 제작한 반면, 확대관은 출구직경 대비 축길이 가 5.0의 크기를 갖도록 길게 제작하여 확대관의

중간에서의 최대 기울기가 6°를 넘지 않도록 하여 이 부분에서의 역압력구배에 의한 유동박리 현상을 가능한 억제하도록 했다. (Fig. 1)

계측 센서로서는 중심에서의 정압 측정을 위하여 Pitot-Static(6 mm)관과 Micromanometer (Furness, FCO12)를 사용했으며, 중심 유동 및 난류 측정을 위하여 직경 5 μm 이고 유효 측정 길이가 1.2 mm인 텅스텐 재질의 X자형의 열선을 사용했다. 각 채널의 출력 신호들은 각각, 채널 당 CTA (KANOMAX 7000), Filter (KANOMAX1015) 및 DC Amp(Kyowa, DA-360A)를 통과시켜 정류된 신호를 16bit A/D변환기를 사용하여 수치 처리하였다. 이때, 난류 측정 시에는 입구 속도를 일정하게 유지하고 두 구조물 각각의 입구, 중간 및 출구들의 중심에서 측정된 적분 시간 길이(Integral time scale)를 기초로 하여 신호 추출 빠르기를 10 Hz로 고정시켰으며 3차 상관항들의 수렴성을 확인하여 각 측정 점에서 15,000개의 신호를 받아서 시간 평균된 값들을 얻었다.

3.2 실험 오차

실험 오차에 대한 분류를 센서 보정 오차, 계측 시스템 오차, 샘플링 오차 및 센서 이송에 의한 센터 이탈 오차한계들을 누적하여 표현할 수 있다.^(11,12) 열선의 보정은 열선 출력 전압과 속도와의 관계를 4차 다항식으로 보정식을 사용했을 때 최대 오차 $\pm 0.5\%$ 를 유지했으며, CTA장비 운용 동안(최대 10 시간 연속)에 측정부의 온도 변화는 약 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 변화 폭을 유지하여 CTA 출력 상에

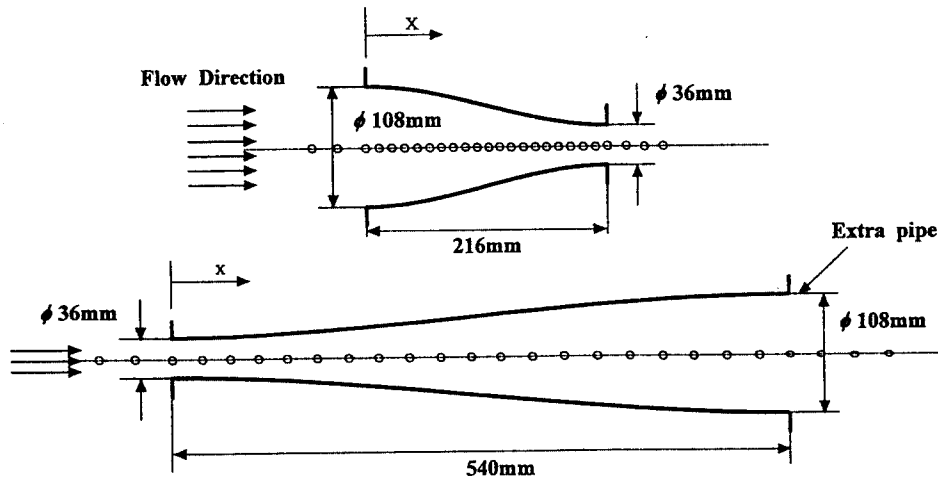


Fig. 1 Test section contours of the contraction and the expansion, and measuring points (o).

± 0.01 Volt의 오차를 유지하여 속도로 환산된 최대 오차는 $\pm 2\%$ 를 보였다. 샘플링 조건에 의한 오차는 식 (4)와 같은 표현⁽¹³⁾을 통하여 계산되었을 때,

$$\epsilon_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\text{var}(u')}{u'^2}} \quad (4)$$

시간적으로 독립적인 시행인 샘플 수, N 이 15,000개에 대한 오차율 ϵ_N 의 크기는 $\pm 0.9\%$ 이내로 계산되었다. 이때, $\text{var}(u')$ 은 난류도의 편차로서 $\overline{(u' - \bar{u}')^2}$ 로 정의된다. 센서의 이송은 0.1 mm의 이송 오차를 갖는 3차원 이송 장치를 활용하였으며 유동 중심과 구조물의 기하학적 중심에 대한 여러 번의 검증을 통하여 최소 단면에서 최대 $\pm 4\%$ 이내의 위치에 대한 오차한계를 확보했다. 따라서 전체적인 실험에 대한 오차의 한계는 평균 및 난류항에 대하여는 $\pm 7.4\%$, 3차 상관항의 경우에는 약 $\pm 9.2\%$ 이내로 압축되었다.

4. 결과 및 분석

4.1 수축부 특성

Fig. 2~5들은 수축부에서 얻어진 중심속도분포, 정압분포, 난류분포 및 3차속도 상관항들의 결과들이다. 입구에서부터 약 $20d$ (d 는 입구 직경) 전방의 위치에서 직교 격자망(Mesh의 크기는 0.025 m)에 의하여 발전된 인위적 난류조건을 제시하여, 입구 중심에서의 평균 유속이 4.1 m/sec, 출구 중심 유속이 27.7 m/sec인 경우에 출구 속도를 기준으로한 난류 성분들이 축 방향 0.4%, 반경 방향 0.45%인 반경 방향 우세의 유입 조건으로 실험을 하였다. 이는 격자 난류는 발생 초기에 축 방향 우세의 특징을 보이기 때문에,⁽¹⁴⁾ 입구 직경과 같은 직선관으로 된 상류에서 측정점 이전에 관로의 수축 효과에 의하여 이미 반경방향성분 우세의 교차 특성을 보이는 영역이 전개되었을 말해 준다. 이는 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 실제의 중심 속도의 크기가 비점성 연속 정리에 기초한 1차원 유동 속도 분포에 비추어 볼 때, 근사한 크기를 보이거나 상류로부터 약간 우세한 크기를 보이고 있으므로 훨씬 상류에서 이미 수축된 효과가 시작하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 중심축을 따라서 측정된 정압분포(Fig. 3)를 관찰한 결과 수축부의 입구로부터 약 $0.7x/L$ 의 부근에서 최대의 정압력 구배

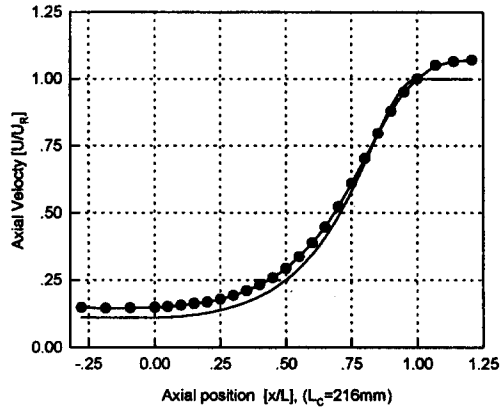


Fig. 2 The measured axial velocity profile and the theoretical velocity profile based on one-dimensional continuity along the centerline of the circular contraction, 1-D analysis ; —, measured data ; ●.

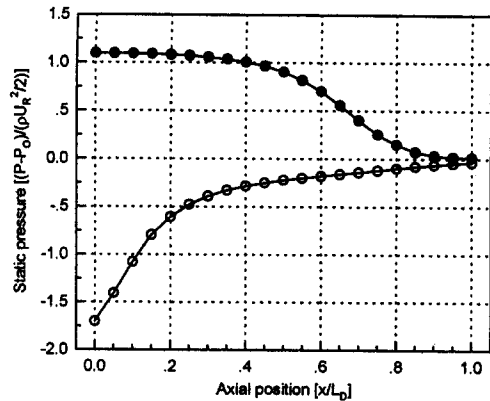


Fig. 3 Normalized static pressure profiles by velocity head along centerlines of the contraction and the expansion, contraction ; ●, expansion ; ○.

를 보이고 있으나 Fig. 2에서 본 바와 같이 중심유동 속도는 최대 가속구간이 $0.75 \sim 0.8x/L$ 부근에서 나타나므로 압력 변형이 수축되는 유로의 변형에 더욱 민감하여 속도 변형에 선행되는 것을 볼 수 있다.

한편, Fig. 4에서 관찰됨과 같이 X자형 열선을 직각으로 회전시켜 각각 U-V, U-W의 짝으로 실험하여 얻은 난류 성분들의 크기는 수축관의 중반 이후부터 반경방향 난류성분이 뚜렷한 우세를 보이면서 극심한 비등방성 난류 영역으로 전개됨을 볼 수 있는데 이는 각운동량의 보존 원리에 근거할

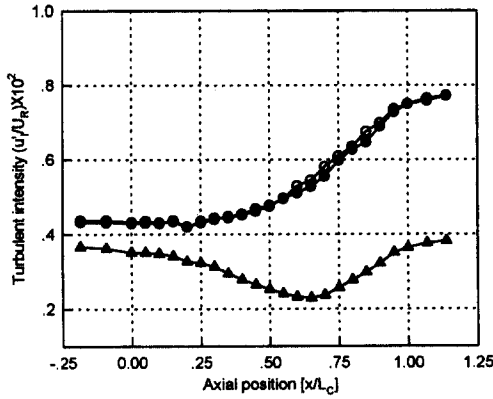


Fig. 4 Profiles of turbulent intensities along the centerline of the contraction, u' ; \blacktriangle , v' ; \circ , w' ; \bullet .

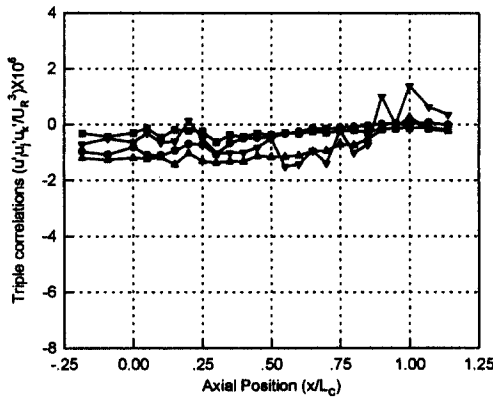


Fig. 5 Distributions of third velocity correlations along the centerline of the contraction, $u'u'u'$; \bullet , $u'u'v'$; \blacksquare , $u'v'v'$; \blacktriangle , $v'v'v'$; \blacktriangledown .

때, 수축관 내의 평균유동 제어체적이 축방향으로 팽창함에 따라 반경방향 난류성분이 증가하는 와류 팽창(Vortex stretching)의 유동 특성을 나타내고 있음을 보여준다. 또한, 그림에서 관찰된 바와 같이 중심에서는 $v' \approx w'$ 의 가정이 성립됨을 보이고 있다. 2차 모멘트의 대표적 특성인 Reynolds stress는 중심 유동에서 shear free의 조건을 갖기 때문에 식 (3)에서 보는 바와 같이 나타나지 않는다.

난류 확산의 중요한 역할을 갖는 3차 상관항의 경우, Fig.5와 같이 얻었다. 일반적으로 3차 상관항의 수렴성을 얻기 위해서는 충분히 많은 신호 샘플과 샘플간의 시간 간격의 선정이 무엇보다도 중요하다. 그러나 이러한 조건을 만족시키기 위해서

는 실험 시간이 대단히 길어지므로(본 실험에서는 약 10시간 연속 실험) 열선의 처짐(saggy)현상과 유동 조건의 변화가 초래되므로 언급된 두 가지 사실의 적절한 조절이 요구된다. 이러한 시행착오 과정을 통해서 얻어진 Fig.5의 결과에서 특히, $\overline{v'v'v'}$ 항은 여전히 이산된 결과를 얻었다. 식 (2)에서 사용될 축 방향 성분의 3차 상관항은 $\overline{u'u'u'}$ 와 $\overline{u'v'v'}$ 이므로 다행히 이들 두 항의 수렴성은 양호하게 나타났다. 유동 방향으로 두 항은 대체적으로 절대량으로 볼 때, 초기에 넓은 직경을 갖는 영역에서 활발한 확산 성질은 보이다가 감소 추세를 보이며 수축부 출구에서 거의 활약이 미미한 것을 나타낸다.

4.2 확대관 특성

출구 직경의 5배의 축 길이를 갖는 역 Morel 형식의 확대관으로 실험을 한 결과 Fig. 6, 7, 9들과 같이 각각 중심속도, 난류성분 및 3차상관항들을 얻었다. 균일한 직선관에 의하여 상류 조건이 제시되어 확대관 입구 직전에서 최대값 30.6 m/sec으로 유입되는 중심 속도는 하류로 가면서 약 6 m/sec의 크기로 빠져나가는데 비점성 유동의 연속 정리를 만족하는 1차원적으로 계산된 평균 유속의 분포에 비하여 상당한 괴리를 보이고 있다(Fig. 6). 특히, 중반에서는 감속되는 정도가 다른 부분보다 작게 나타나며 약간 돌출 되는 현상을 보이므로 내부 곡면의 기울기가 최대인 굴곡이 심한 벽면 근처에서 유동의 박리에 의한 실질적인 유로의 감축 현상이 동반된 것으로 이해된다. 또한, Fig.3에서 관찰된 바와 같이 확대관에서의 정압 분포는 확대관 초기 0~0.2 x/L 구간에서 최대 역압력 구배가 나타나므로 Fig.6에서 보는 바와 같이 중심 유동 속도가 이론적 평균 유동 속도에 비해 완만하게 나타나는 사실과 유로의 감축 현상에 역압력 구배의 영향이 있었음을 뒷받침해 준다. Fig.7에서는 확대관에서의 난류 분포를 보이고 있는데 하류로 감에 따라 수축부와는 상반된 축방향 난류성분 우세의 국면으로 접어드는 것을 볼 수 있다. 확대관 출구에 출구 직경의 3 배 되는 길이의 직선관을 연결함으로써 출구 부근에서의 불안정 요소들⁽⁹⁾을 억제시켰으며 또한 연결된 직선관으로 실질적인 확대관의 영역이 늘어나면서 훨씬 빠르게 등방성 난류 영역으로 회귀하는 것을 관찰할 수 있다. Fig.7에서 알 수 있듯이, 수축부는 대부분의 영역에서 극심한

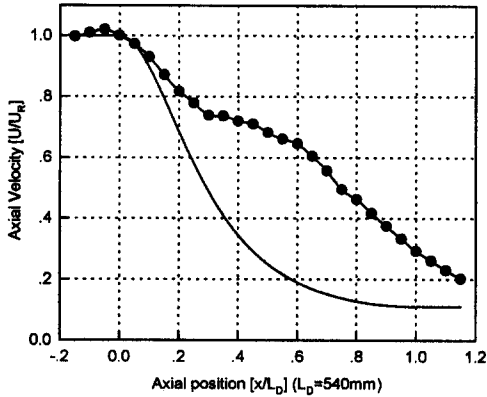


Fig. 6 The measured axial velocity profile and the theoretical velocity profile based on one-dimensional continuity along the centerline of the circular expansion 1-D analysis; —, measured data; ●.

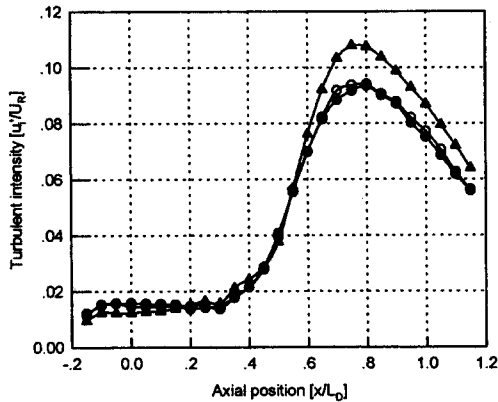


Fig. 7 Profiles of turbulent intensities along the centerline of the expansion, u' ; ▲, v' ; ○, w' ; ●.

비등방성의 난류장이 형성된대 반하여 확대관의 경우 비교적 등방성에 가까운 난류장을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이 사실은 수축관의 최대 비등방성 난류의 값, $\overline{v'^2}/\overline{u'^2}$ 의 크기가 수축관의 3/4 위치에서 약 6배의 크기를 갖는 반면 확대관에서의 최소 값이 비슷한 위치에서 약 0.7의 크기를 갖는 것으로 보아(Fig. 8) 같은 면적 비의 수축 및 확대비를 갖는 구조물의 경우에도 확대관에 의한 축 방향 난류 성분의 회복은 어려운 것으로 판단된다. 초기에 반경 방향 성분의 우세인 조건으로 유입된 난류 성분들은 확대관의 중반까지 거의 비슷한 등방성을 유지하다가 중반 이후 축 방향 성분의 급격한 성장

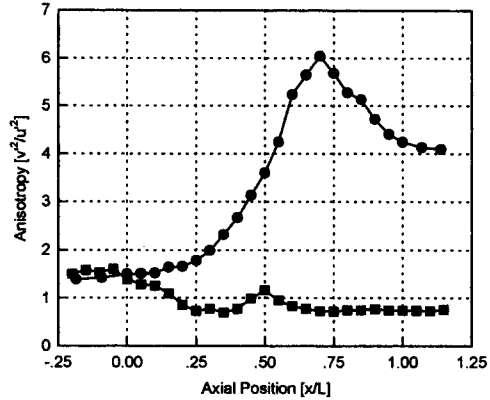


Fig. 8 Anisotropies along the centerlines of the contraction and the expansion respectively, contraction : ●, expansion : ■.

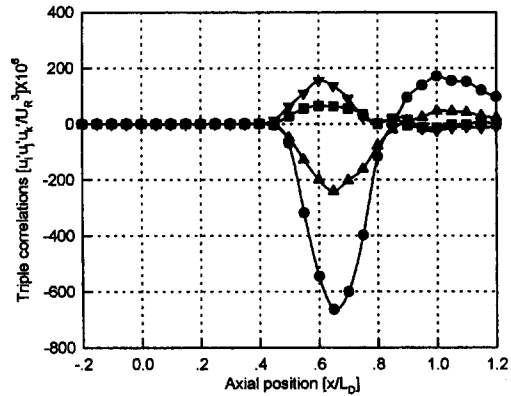


Fig. 9 Distributions of third velocity correlations along the centerline of the expansion, $u'u'u'$; ●, $u'u'v'$; ■, $v'v'v'$; ▲, $v'v'u'$; ▼.

을 보이고 있는데 이는 수축부에서 나타나는 와류 팽창의 현상과는 반대로 확대관 내에서의 평균 유동의 체적변형이 축방향으로 팽창됨에 따라 와류 압축(Vortex compression)의 현상을 동반하는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 중심 축의 3/4부근에서는 두 방향 성분 모두가 매우 활발한 난류 생성이 이루어지고 있는데 이는 와류 압축 현상과 더불어 확대관의 유입 부근에서 이미 극심한 역압력 구배에 의한 확대관 중심 부근에서의 유동 분리 현상이 동반되어 벽면의 불안정 요인들이 중심으로 전달되어 전체적으로 두 성분 모두가 증가되는 것으로 판단된다. 따라서, 이 부근의 난류 생성이 향후 하류에서의 난류 특징을 주도하고 있는 것으로 관찰된

다.

또한, Fig. 9에서 관찰되는 확대관 중심에서의 3차 상관항들은 수축관의 경우에 비하여 매우 정량적으로 수렴된 양상을 보이면서 변화 추이도 뚜렷하여 역시, 중반 이후부터 활발한 변화를 보이는데 특히, $\overline{u'u'u'}$ 성분과 $\overline{u'v'v'}$ 성분들이 확산의 주도적인 역할을 보이고 $\overline{u'u'v'}$ 및 $\overline{v'v'v'}$ 성분들과는 대조적인 변화를 보이면서 중반 이후의 확산 특성을 주도하는 것이 관찰되었다. 수축관의 3차 상관항들은 절댓값들의 크기가 매우 미약하여 확대관들의 동류항들과는 비교가 안되고 있으며 초기 값들이 출구로 갈에 따라 절댓값들이 감소되고 있는 반면, 확대관에서는 초기에 상대적으로 정숙한 활동을 보이다가 후반부에서 절댓값도 매우 커지며 변화 추세도 급격한 특성을 보이고 있어서 난류 확산이 활발해짐을 알 수 있다.

5. 난류 운동에너지 분배

축 대칭 중심 유동은 관벽 근처의 유동과는 매우 다르지만 중심을 포함한 대부분의 유동 영역에서의 유동 구조를 쉽게 예측할 수 있는 장점이 있다. 특히, 유로의 형태가 변함에 따라 난류 구조의 변화를 예측할 수 있으므로 유체 수송의 효율적인 방법과 난류 생성 및 억제 면에서 필요한 자료를 제시한다. 앞 절에서 얻어진 계측 자료를 이용하여 식 (3)에서 제시된 TKE의 분할 과정을 각각 수축관 및 확대관에서 살펴보기로 한다. 이때, 식 (3)에서 난류 전달항의 압력상관항과 점성일항으로 표현되는 잔류항을 무시한 근사식을 사용하여 측정 가능한 물리량에 의해서만 평형을 가정했음을 지적한다. 따라서, 난류소산은 계측된 양들만을 이용하여 평형 방정식에서 간접적으로 계산하여 각 에너지 항들의 분할특성을 관찰하는 것으로 제한한다. 수축관을 통과하면서 이루어지는 TKE 평형은 Fig. 10에서와 같이 평균 에너지 전달항과 난류생성항과의 평형을 근간으로 하고 있다. 이때, 난류 전달항은 비록 압력상관항과 점성일 항들이 무시되었다 할지라도 3차 상관항의 $\overline{u'q^2}$ 항의 크기와 비슷할 것으로 판단되어 그 영향은 미미한 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 수축관 중심에서의 에너지 평형은 생성항과 평균에너지 전달항과의 주된 평형과 이들 두 항의 차이에 의하여 예측되는 소산항과의 평형으로 분할 구조를 이루고 있음을 알 수 있다.

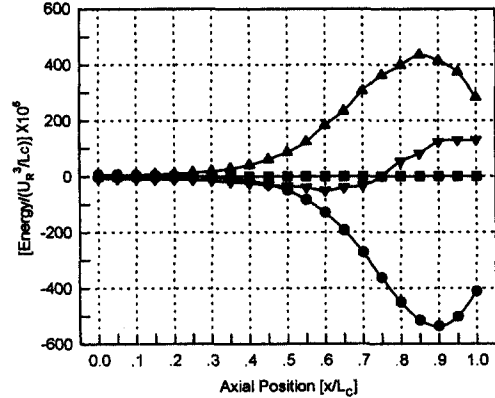


Fig. 10 TKE budgets along the centerline of the contraction, advection : ●, diffusion : ■, production : ▲, dissipation : ▼.

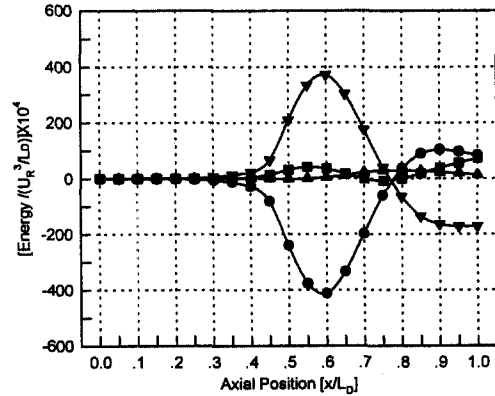


Fig. 11 TKE budgets along the centerline of the expansion, advection : ●, diffusion : ■, production : ▲, dissipation : ▼.

한편, 확대관에서는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 중반에서부터 난류 구조의 변화가 심하게 일어나며 평균 에너지 전달항과 소산항들에 의한 평형이 주도되고 있으며 이들은 출구로 갈에 따라 서로 교차되는 특성을 보인다. 상대적으로 생성항의 역할이 미약해지며 전달항은 수축관에 비하여 활발한 추세이다. 특히, 확대관 중반 부근에서는 관의 확대에 의한 영향으로 압력항의 역할이 클 것으로 기대되어 실제로 확산항의 크기는 커질 것으로 예상되나 소산항과 평균항에 의한 역할은 여전히 주도적일 것으로 생각된다.

6. 결 론

면적비 9:1인 수축관과 확대관을 지나는 유동의 중심선에 따라서 열선 풍속계에 의해 측정된 난류량들을 분석한 결과 두 구조물의 대칭적 특징들을 다음과 같이 얻었다.

(1) 두 구조물의 중심 속도들에서 특히, 확대관의 경우는 1차원 연속 정리와의 심한 괴리를 보였으며 두 구조물 모두 상류와 하류에 연결된 직선관에 의하여 실질적인 수축거리와 확대거리가 각각 실제 길이보다 길게 나타남을 알 수 있다.

(2) 수축관에 의해서 얻어진 반경방향 난류성분 우세율은 확대관에서 얻어진 축방향 난류성분 우세율보다 매우 크게 나타나기 때문에 확대관에 의해서 등방성 난류로 회귀하는 과정이 훨씬 빠르게 진행된다.

(3) TKE분배 면에서 볼 때, 수축관내 유동은 난류운동에너지 평형식의 평균 에너지 전달항이 생성항들과 평형을 이루고 있는 반면, 확대관에서는 평균에너지전달항이 주로 소산항과 평형을 이루고 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 첨단유체공학연구센터의 일부 지원 금에 의해서 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사함을 드립니다. 또한, 실험과 자료 정리에 도움을 준 윤원석, 김승훈, 정운진 군들에게 감사함을 드립니다.

참고문헌

- (1) Uberoi, M. S., 1956, "Effect of Wind-Tunnel Contraction on Free-Stream Turbulence," *Journal of Aeronautical Science*, August, pp. 754~764.
- (2) Ramjee, V. and Hussain, A. K. M. F., 1976, "Influence of the Axisymmetric Contraction Ratio on Free-Stream Turbulence," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98.
- (3) Tan-Atichat, J., Nagib, H. M. and Druka, R. E., 1980, "Effect of Axisymmetric Contractions on Turbulence of Various Scale," NASA Contractor Report 16513.
- (4) 한용운, 남경덕, 1992, "상류유동전개부, 수축부 및 자유분사류로 이어지는 유동장에서의 난류 에너지 천이에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제11호, pp. 2857~2866.
- (5) Choi, K., 1983, "A Study of the Return to Isotropy of Homogeneous Turbulence," Ph. D. Dissertation, Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University.
- (6) Han, Y. O., Nam, G. D. and Kim, D. S., 1993, "Turbulent Kinetic Energy Balance along the Centerline of Axisymmetric Flows," *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 2*, Ed. by Rodi W. and Martelli, F., Elsevier Science Publishers, pp. 489~497.
- (7) 이장환, 한용운, 1997, "확대관의 난류구조 변동에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제4호, pp. 503~508.
- (8) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contraction," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 97, No. 2, pp. 225~233.
- (9) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill Book Company, pp. 68~78.
- (10) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1973, *A First Course in Turbulence*, MIT Press, pp. 104~145.
- (11) Telionis, D. P., 1991, "Journal of Fluids Engineering Policy on Reporting Uncertainties in Experiments and Results," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, No. 9, pp. 313~312.
- (12) 김경천, 정양범, 1995, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(4)," 대한기계학회 논문집 제19권 제5호, pp. 1340~1350.
- (13) George, W. K., Beuther, P. D. and Lumley, J. L., 1978, "Process of Random Signals," *Proceedings of the Dynamic Flow Conference*, Copenhagen, Denmark, pp. 757~799.
- (14) Han, Y. O. and George, W. K., 1991, "Turbulence Energy Budgets through a Contraction," *Progress of US-Korea in Fluids Engineering*, Ed. by Kim, J. H. et al, KAIST Taejon, Korea, Hemisphere Publishing Company, pp. 243~253.