

<논 문>

확대관의 난류구조 변동에 관한 연구

이 장 환* · 한 용 운**

(1996년 3월 20일 접수)

A Study on the Change of Turbulence Structure in a Diffuser

Jang-Hwan Lee and Yong-Oun Han

Key Words : Diffuser(디퓨저), Centerline Turbulence(중심유동 난류), Anti-Morel(역 Morel), Hot Wire Anemometry(열선유속계), Vortex Compression(와도 압축)

Abstract

The change of the structure of homogeneous turbulence subject to irrotational strains has been studied in an anti-Morel type diffuser(center matched cubic contour) using the hot wire anemometry. It was observed that the profiles of mean velocities and turbulence velocities along the center line were stable at the entrance region but rapidly changed near the matching point. The wall induced turbulence at the entrance region grows fast and was diffused toward the center at downstream. It was also observed that the axial turbulence grows faster than the radial one in the middle region of the diffusing flow and that the diffusing process has the vortex compression mechanism due to the conservation of angular momentum. These phenomena are frequently observed at the initial flow region of the free jet.

1. 서 론

난류의 구조는 일반적으로 비균질 이방성이지만, 유동 중에 지속적으로 에너지를 공급받지 않으면 cascade 과정을 거치면서 균질 등방성 유동으로 변화하게 된다. 또 등방성난류가 전단변형을 받으면 유동구조가 바뀌면서 이방성난류로 변화하게 되는데, 이러한 변화 과정을 조사하는 것은 난류의 특성연구에 대단히 중요하다. 등방성 난류를 발생시키는 수단으로서 유동장 속에 격자(grid)를 설치하는 방법이 많이 이용되어 왔으며, 등방성 난류에 비선회변형(irrotational strain)을 가하는 방법으로는 평면변형(plane strain), 축대칭축소(axisymmetric contraction), 확대(expansion) 등

을 들 수 있다. 평면변형에 관한 연구는 Comte-Bellot,⁽¹⁾ Tucker,⁽²⁾ Reynolds⁽³⁾ 등이 지속적으로 수행한 바 있으며, 축대칭 축소관류에 대한 연구는 Uberoi⁽⁴⁾ 이래 Tan-atchat,⁽⁵⁾ Shabbir,⁽⁶⁾ Han⁽⁷⁾ 등, 많은 사람들이 참여하고 있다. 이들의 연구 결과에 따르면 Morel⁽⁸⁾ 식 축소관은 유동의 안정화에 적합한 구조이며, Han에 의하여 축소관 유동은 와도 신장을 일으켜 축방향난류가 반경방향난류보다 빨리 감소된다는 사실이 보고된 바 있다.

확대관유동은 내부유동의 한 형태로서 역압력구배가 발생하여 박리현상이 동반되기 쉬운 유동으로서, 유동에너지의 천이 및 재분배과정, 등방성유동에 변형을 가하는 방법 등의 측면에서 학문적인 연구 가치가 매우 크다. 그럼에도 확대관 유동은 그 실험의 난이성 때문에 실험 연구 사례는 상당히 희귀하다. 원추형 확대관 유동에 관한 실험 연구는 Stieglmeier⁽⁹⁾는, 조⁽¹⁰⁾ 등이 수행한 바 있으며,

*회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

**회원, 영남대학교 기계공학과

Choi⁽¹¹⁾는 구형단면(矩形斷面)의 축대칭확대관을 통과한 유동의 등방성 복귀에 대해 연구한바 있다. 그러나 원형단면의 3차원곡면을 가진 확대관에 대한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 역 Morel 식 확대관에 등방성 난류를 공급했을 때의 확대관 내부 유동특성, 특히 난류 구조의 변화를 파악하고, 3차원곡면을 가진 Morel 식 축소관 내의 유동 및 자유분사류의 특성과 비교될 수 있는 실험적 자료를 제시하여 단면 변화에 따른 난류구조의 천이 특성을 알아보고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치의 구성

실험장치는 기본적으로 송풍기와 유동안정부, 직관, 수축부, 직관, 확대관, 직관으로 구성된다. 송풍기는 5 마력의 원심식으로서 회전수를 변화시켜 풍속을 조절할 수 있도록 하였다. 유동안정부는 직경 40 cm, 길이 150 cm의 원통형으로 제작하여 honey comb 2조와 스크린을 내장하여 유동을 직선화하며 송풍기의 유동간섭 현상을 감소시켰으며, 유동안정부에 이어서 1차 수축부를 연결하고 이어서 직경 11 cm, 길이 150 cm의 직관을 설치하고, 이어서 2차 수축부를 달았다. 2차 수축부에 이어서 직경 3.6 cm, 길이 62 cm의 직관에 honey comb (길이 6 cm)과 매시 번호 80의 스크린(14.3% solidity)을 설치하여, 수축부에서 발생할 수도 있는 선회성분을 감소시키고 안정된 유동을 확대관 초기에 공급하고자 하였다.

이어서 연결된 확대관의 구조는 입구 직경 3.6 cm, 출구직경 10.8 cm, 길이 54 cm 로서 Fig. 1에 보인 것과 같이 벽면의 윤곽은 두 개의 3차 곡선이 가운데에서 연결되는 역 Morel 형식이다. 즉, 관의 전반부는 안으로 볼록하고 후반부는 밖으로 볼

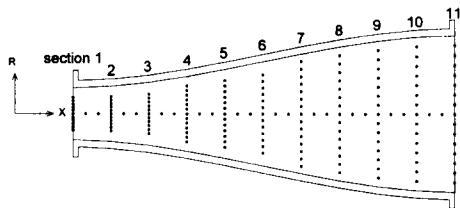


Fig. 1 Diffuser contour, coordinate system, and measuring points(·).

록한 구조로서, 윤곽선의 접선 기울기는 입구와 출구에서 0°이고 중심부에서 최대(5.711°)로 되며, 이 점을 중심으로 전반부와 후반부의 벽면 윤곽의 접선 기울기가 대칭을 이루도록 하였다. 확대관의 재질은 알루미늄으로써 정밀수치제어선반으로 절삭하여 곡면의 정밀도를 확보하였으며 벽면을 매끈하게 가공함으로써 벽면의 거칠음이 난류를 발생시킬 가능성을 줄였다. 확대관에 이어 직경 10.8 cm, 길이 10.8 cm인 직관을 연결하여 축정관의 출구에서 발생 가능한 불안정한 요인들이 확대관의 흐름에 영향을 미치지 않도록 하였다.

2.2 측정 및 data 처리

유동장을 측정하기 위해 정온형 열선풍속계(KANOMAX 7000)를 사용했다. 센서로는 직경 5 μm, 유효길이 1.2 mm인 텅스텐선으로된 × 형태의 열선을 사용하였으며 센서를 강철제 파이프에 고정시킨 다음 볼스크류식 3차원 이송장치에 탑재하여 이송했다. 인덱스를 이용하여 열선을 90°씩 회전시켜 3방향 유속 성분과 난류들을 측정했다.

오리피스식 보정기(KANOMAX 7901 probe calibration system), 압력변환기(MKS Baraton 223 B)를 이용하여 풍속계를 보정하였다. 이때 풍속계의 출력전압(E)과 유속(U)의 관계는

$$U = \sum_{n=0}^4 A_n E^n \quad (1)$$

의 4차 다항식으로 가정하고 최소자승법으로 계수(A_n)를 구하였으며, 측정치와 보정식 간의 최대오차가 1% 이내인 성능을 보이는 열선을 실험에 사용했다.

A/D변환기를 이용하여 풍속계의 출력신호를 적절한 시간 간격으로 디지털화하여 채취했다. George⁽¹²⁾에 의하면 모멘트 측정시 독립적 data를 얻기에 적합한 자료채취간격(data sampling interval)은 integral time scale(τ)의 두 배가 적절하다. integral time scale은 식 (2)로 표시되는데, 식 중 $S(0)$ 는 single wire half line spectrum으로서 FFT 스펙트럼분석기를 이용하여 측정된다.

$$\tau = S(0) \frac{\pi}{u'^2} \quad (2)$$

위 식을 이용하여 τ 를 구한 결과 확대관의 입구에서 출구까지 0.0089~0.005 초의 분포를 보였으며, 이것을 감안하여 자료채취주파수(data sampl-

ing frequency)를 10 Hz로하고, 한 측정점 당 2000 개의 data를 채취하여 평균속도와 난류속도를 산출하였다. 확대관 입구의 난류 강도가 매우 작으므로 (평균속도의 1% 이하) 증폭기의 이득을 500에서 10까지 적절히 조절하며 자료를 받았으며 저역 통과필터(low pass filter)로 주파수 10 kHz 이상의 신호는 차단하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 측정한 data를 처리하는 과정을 나타내는 block diagram이다.

본 연구에서 제시한 각 속도 값에는 몇 가지의 오차가 포함되어 있다. 이들 오차 중에 중요한 것들은 CTA 시스템이 가지는 오차, 실험 도중의 온도 변화에 의한 오차, 보정식의 오차, 데이터 샘플링 수의 유한함에서 발생하는 오차 등이다. 본 실험을 하는 동안에 실험실의 기온 변화는 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 정도이었고, 이에 따라 CTA 출력 전압은 ± 0.01 volt 정도 변화하였다. 이 출력전압의 오차에 의해 발생하는 속도 측정상의 오차는 $\pm 2\%$ 정도이다. 그리고 CTA 시스템이 가지는 오차는 프루브의 저항에서 주로 발생하게 되며, 이 프루브의 저항에 의한 오차는 0~60 ohm 사이에서 약 $\pm 0.3\%$ 정도이다. 또, 보정식의 최대오차 $\pm 1\%$, 데이터샘플링에 의한 오차 약 $\pm 1\%$ 를 모두 감안하면 측정된 속도 값의 총 오차율은 약 $\pm 4.3\%$ 정도로 추측된다.

2.3 측정 점의 위치

확대관 내의 전반적인 유동 특성을 파악하기 위해 확대관의 중심 축을 포함하는 수평면상의 여러 곳에서 유속을 측정하기로 하고, 확대관을 유동방향으로 10 등분한 각 단면(11개)의 적경 상에 등간격으로 11~15개의 측정 점을 설정하였다. 그리고 확대관의 중심 축에 등간격으로 31개의 측정 점을

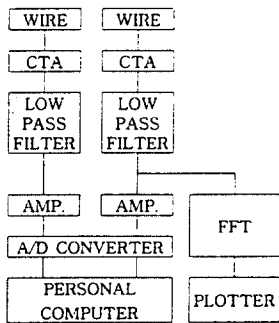


Fig. 2 Instrumentation and data processing block diagram

잡았다. 측정 점의 분포는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 단면의 번호는 입구부터 유동방향을 따라 1에서 11로 배정했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 난류 유동장

Fig. 3은 확대관의 입구에서 출구까지 각 단면에서 측정한 축방향평균속도(U)의 분포를 표시한 것이다. 그림의 종선은 각 측정단면의 위치를 보이는 것이고, 측정값들은 기준속도(U_R : 확대관 입구 중심점의 축방향 속도)로 나누어 무차원화한 것이다.

단면 1~2에서는 단면 전체에서 대체로 균일한 속도 분포를 이루고 있는데, 벽면 근접 지역에서는 속도가 급감할 것으로 예상되나 센서 이송시에 열선의 파손이 우려되어 data는 제시되지 못했다. 3 단면 이후부터 벽면 쪽의 속도가 급히 감소되어 7, 8 단면에서는 정규분포 곡선의 형태를 보였으며, 10, 11 단면에 이르러 그 주위로 완만하게 감소되는 추세를 보인다. 또한 확대관 자체가 전방과 후방의 곡면 구성이 상반되는 3차 곡선 형태이기 때

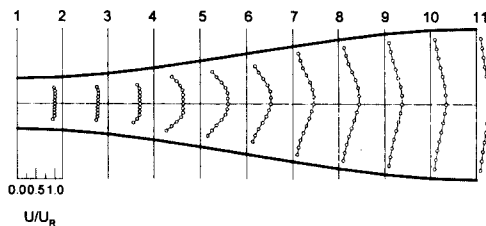


Fig. 3 Evolution of axial mean velocity profiles at each sections.

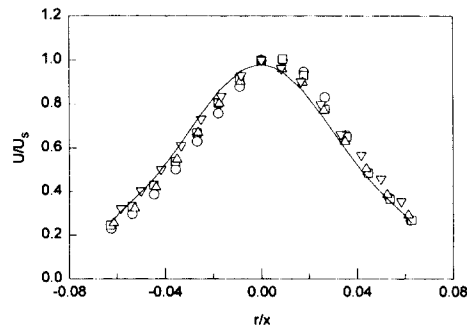


Fig. 4 Similarity of axial mean velocity profile at sections, 8(○), 9(□), 10(△), 11(▽), and similar curve(—).

문에 자유분사류에서 흔히 발견되는 것과는 달리 확대관 전반에 걸친 self similar curve는 찾을 수 없었으나, 다만 8 단면에서 11 단면에 이르는 부분적인 영역에서는 상사성을 보였다. Fig. 4에서 각 속도는 해당 단면의 중심속도(U_s)로 무차원화하고, 우함수만으로 구성된 8차의 다항식을 사용하여 중심축에 대한 대칭성을 검사하였다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 본 실험은 우측에서 유속이 약간 빠른 경우로 측정이 되었다.

Figs. 5, 6은 무차원화 된 축방향난류성분(u'/U_R)과 반경방향난류성분(v'/U_R)을 Fig. 3과 같은 방법으로 그린 것이다. 단면 1~3의 유동은 중심에서 좌우로 관 반경의 3/8 이내의 영역에서 난류강도가 매우 작고, u'/U_R 과 v'/U_R 의 크기가 비슷하여($u'/U_R=0.00798$, $v'/U_R=0.00779$), 확대관 초기에 균질등방성 난류가 성공적으로 제시되었음을 보인다. 초기의 단면에서 벽면 근접지역의 난류가 상대적으로 큰 값들로 측정되었으며, 하류로 가면서 벽면 부근의 난류가 중심 쪽으로 확산되면서 난류속도가 크게 증가함과 동시에 중심의 균질등방성 유동의 영역이 차츰 좁아지고, 6 단면의 하류에 이르러 전 영역에 걸쳐 난류속도가 매우 큰 유동장이 형성된다. 특히 4~7 단면에서는 센서 이동 영역 내에서 난류강도가 최대인 점이 양쪽에 대칭으로

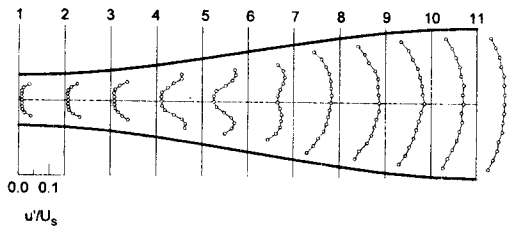


Fig. 5 Evolution of axial turbulent velocity profiles at each sections.

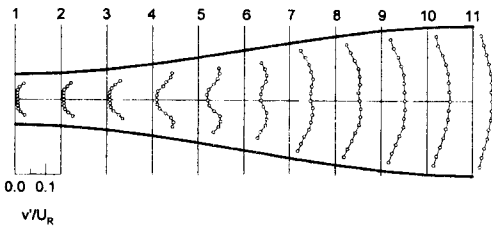


Fig. 6 Evolution of radial turbulent velocity profiles at each sections.

존재하고 있으며, 하류로 갈수록 그 위치들이 중심 쪽으로 이동하여 7~8 단면에 이르러서 만나고 있음을 볼 수 있으며, 8 단면 이후 확대관 출구까지 난류속도는 중심부에서 최대 값을 가지고 벽 쪽으로 갈수록 단조 감소하는 분포를 가지고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 초기에 벽면 근처에서 강한 난류의 생성이 나타나서 하류로 갈수록 점차 중심부위로 옮겨가는 과정을 보였으며 특히 중간 단면에서 난류의 최대 mixing 현상들이 진행되고 있음을 보였다.

난류의 분포에 대하여서도 확대관의 끝 부분의 일부 구간에서 self similar한 결과를 보였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 여기서도 중심선 우측의 난류강도가 조금 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 평균속도의 크기가 우측으로 약간 편향된 것에서 연유한 것 같다.

3.2 중심유동 특성

중심선 난류 유동 특성은 유동 구조에 따라서 난류천이과정을 쉽게 예측하여 하류의 난류구조를 이해하는데 매우 편리하다. 따라서 앞 절에서 언급한 대로 data의 대칭성이 중요한 인자가 되는데 많은 경우 확대관의 기하학적 중심과 유동의 중심은 약간씩의 이탈을 보일 수 있다. 그러나 본 연구에서 얻어진 이탈의 정도는 중심난류 특성의 천이를 정성적으로 관찰하는데 거의 영향이 없을 것으로 판단된다.

한편 많은 관내유동 및 분사유동의 초기치는 하류의 난류구조 전개에서 중요한 인자로서 인식된다. 본 연구에서도 초기유속의 변화가 유동구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 입구중심속도를

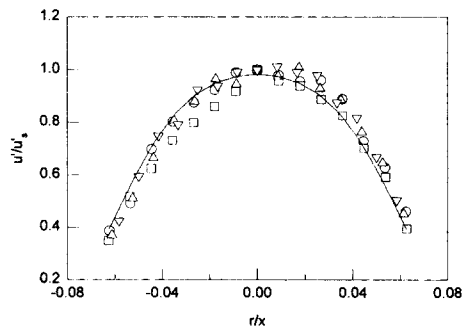


Fig. 7 Similarity of axial turbulent velocity profile at sections, 8(O), 9(□), 10(Δ), 11(▽), and similar curve(—).

($U_{R1}=18.714$ m/s, $U_{R2}=24.296$ m/s, $U_{R3}=29.132$ m/s)로 변형시켰는데 Fig. 8은 중심선평균속도의 변화를, Fig. 9는 같은 조건하의 난류속도의 변화를 그린 것이다. 각 속도 값들은 각 단계별 입구중심속도로 나누어 무차원화시켰는데 횡축을 확대관의 입구로부터 측정점까지의 거리를 확대관의 길이(L_0)로 나눈 값을 잡았을 때, 각 단계별 속도분포곡선이 거의 겹쳐져 나타나는 것으로 보아 본 연구에서 고려된 유속의 범위 내에서는 난류속도의 변동 추세가 거의 유사하다는 것을 알 수 있으므로, 현 조건에서의 초기치에 대한 민감도는 작은 것으로 관측된다.

Fig. 10은 입구중심속도(U_R) 24.296 m/s인 경우

의 중심선 평균유동속도를 각각 확대관 중심선의 값과 유동 중심선의 값들을 나타낸 것이다. 언급된 대로 두 자료의 이탈 정도는 무시될 수 있다고 보며 반경방향 평균속도들(V/U_R , W/U_R)도 모든 측정점에서 거의 0에 가까운 값을 유지하고 있는 것으로 보아 확대관의 중심선과 유동의 중심선이 상당히 근접한다는 사실의 증거로 삼을 수 있다. 그림의 실선은 확대관 유동단면적비의 역수를 그린 것으로서 확대관의 전단면에 걸쳐 속도가 상사한 분포를 가질 경우, 연속의 법칙에 의해 예상되는 평균속도를 나타낸다. 축방향평균속도(U/U_R)는 유동이 진행됨에 따라 감소하지만, 면적변화에 따라 예상되는 속도보다 그 감소율이 크게 낮은 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 Fig. 3에서 본 바와 같이

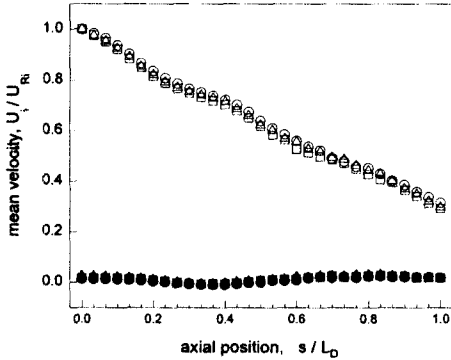


Fig. 8 Normalized mean velocity profiles along the centerline, (18m/s : axial ; \circ , radial ; \bullet), (24m/s : axial ; \square , radial ; \blacksquare), and (29m/s : axial ; \triangle , radial ; \blacktriangle).

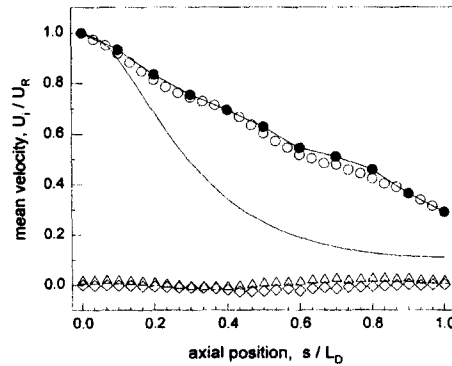


Fig. 10 Normalized mean velocity profiles along the centerline. (geometric center U/U_R ; V/U_R ; \triangle , W/U_R ; \diamond), and (flow center U/U_R ; \bullet), continuity ; --- .

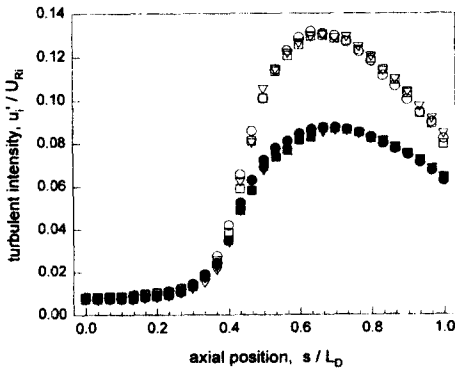


Fig. 9 Normalized turbulent velocity profiles along the centerline, (18m/s : axial ; \circ , radial ; \bullet), (24m/s : axial ; \square , radial ; \blacksquare), and (29m/s : axial ; \triangle , radial ; \blacktriangledown).

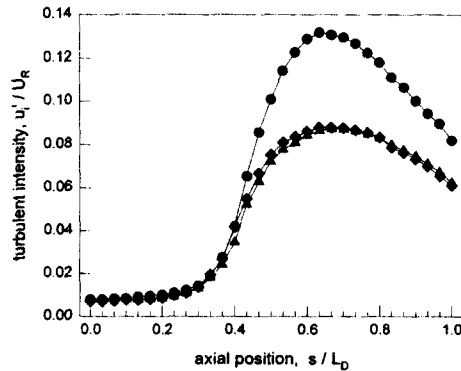


Fig. 11 Normalized turbulent velocity profile along the centerline, u'/U_R ; \bullet , v'/U ; \blacktriangle , w'/U_R ; \blacklozenge .

입구단면의 속도분포는 균일하나 중 하류의 속도분포가 종 모양을 이루면서 유동이 신속하게 확산되지 않고 중심선 근방의 유속이 고속으로 유지되어 속도 분포가 크게 변화한 사실로 그 원인을 설명할 수 있다.

Fig. 11은 중심선상의 난류속도를 U_R 로 무차원화하여 그린 것이다. 입구의 u'/U_R , v'/U_R , w'/U_R 은 각각 0.0079843, 0.0077877, 0.0071418로써 매우 작은 값이며 그 크기들이 비슷하다. 이 세 성분의 난류속도는 유동이 확대관 전 길이의 0.4($x/L_D=0.4$) 되는 위치에 도달한 후부터 급히 증가하기 시작하여 $x/L_D=0.6$ 인 지점에 이르러 최대치가 되며 그 이후에 감소한다. 특히 주목을 끄는 것은 u' 의 증가율(16.503배)이 v' 의 증가율(11.209배)과 w' 의 증가율(11.319배)보다 훨씬 크다는 점이다. 이는 축소관유동의 와도신장현상과는 대조적인 것으로서, 확대관유동에는 축방향난류가 더 크게 증가하는 와도압축현상이 존재한다는 것을 입증하는 것으로 볼 수 있다. 또한 이런 유동 특성은 자유분사류의 초기유동에서 흔히 목격되는 축난류 우세현상과 매우 유사하므로 대부분의 분사류 초기는 노즐 출구에서 매우 짧으나 순간적인 확대과정이 일어나면서 축방향 난류성분이 순간적으로 우세해짐을 잘 나타내고 있다.

4. 결론

면적확대비 1:9, 입구직경 대 길이 비 1:15인 역 Morel 식 확대관의 내부유동에 대하여 실험, 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 확대관 전반부의 중심 유동은 상당히 안정되어 있으나 벽면 난류는 활발함을 보였으며, 중간단면 이후에서는 벽면난류가 매우 급하게 중심으로 이동되면서 활발한 난류 mixing이 이루어짐을 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서 고려된 유속의 범위 내(18~30 m/s)에서는 확대관 초기의 유속이 변화해도 난류속도의 변동 추세가 거의 일정하다는 것을 알 수 있었다.

(3) 확대관의 중심선을 따라서 초기 등방성 유동이 비등방성 유동으로 전개되면서 난류속도가 증가하며, 축방향난류의 증가율이 반경방향난류의 증가율보다 우세함을 발견하였다. 이것으로부터 확대관류에서 '와도압축현상'이 존재함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Comte-Bellot G. and S. Corrsin, 1966, "The Use of a Contraction to Improve the Isotropy of Grid-Generated Turbulent," *JFM*, Vol. 25, pp 657.
- (2) Tucker H. J. and Reynolds A. J., 1968, "The Distortion of Turbulence by Irrotational Plane Strain," *JFM*, Vol 32, pp 657~673.
- (3) Reynolds A. J. and Tucker H. J., 1975, "The Distortion of Turbulence by General Uniform Irrotational Strain," *JFM*, Vol. 68, pp 673~693.
- (4) Uberoi M. S., 1956, "Effect of Wind-Tunnel Contraction on Free-Stream Turbulence.," *J. of Aeronautical Sci. Aug.*, pp 754~764.
- (5) Tan-atchat J., Nagib H. M., Drubka R. E., 1980, "Effects of Axisymmetric Contractions on Turbulence of Various Scales," NASA Contractor Report 165136.
- (6) Shabir A., 1983, "Investigations of the Functional Form of the Coefficients of the Reynolds Closure.," MS Thesis, University at Buffalo, Suny.
- (7) Han Y. O., 1988, "The Effect of a Contraction on Grid-Generated Turbulence," Ph. D Thesis, University at Buffalo, Suny.
- (8) Morel T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contraction," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 97, No. 2, pp 225~233
- (9) Stieglmeier M., Tropea C., Weiser N., Nitcher W., 1989, "Experimental Investigation of the Flow Through Axisymmetric Expansions," *Journal of Fluids Eng.*, Vol.111, pp 464~471
- (10) 조 원일, 1990, "원추형 디퓨저에서 난류유동에 관한 실험적 고찰," 한국항공우주학회지, 제 18권, 제1호, pp. 27~35.
- (11) Choi Kwing-So, 1983, A Study of Return to Isotropy of Homogeneous Turbulence, Ph.D Thesis, Cornell University.
- (12) George, W. K., 1978, "Processing of Random Signals," *Proceedings of the Dynamic Flow Conference*, pp. 757~799.