

유입 선회류에 대한 디퓨저 손실 및 난류특성에 관한 연구

정효민 · 고대권 · 양정규*

부산수산대학교 · *여수수산대학

(1992년 4월 7일 접수)

A Study on Pressure Loss and Turbulent Characteristics in a Conical Diffuser with a Swirl Flow

Hyo-Min JEONG, Dae-Kwon KOH and Jung-Kyu YANG*

National Fisheries University of Pusan, *Yosu National Fisheries University

(Received April 7, 1992)

In this paper, the relationship between static pressure recovery and turbulent energy was presented in case of swirling flows into a conical diffuser. The distributions of turbulent energy in a diffuser sectional area were measured by a hot wire anemometer.

The following conclusion can be drawn from the experiments.

Diffuser loss is constituted by a dynamic pressure loss and total pressure loss. The static pressure recovery depends strongly on the total pressure loss, and the turbulent energy varies inversely as the static pressure recovery coefficient.

서 론

유체기계에서 에너지를 유효하게 이용하기 위하여 디퓨저가 널리 사용되고 있다. 특히, 터보기계에서 출구의 속도는 선회성분을 가진 흐름이 된다. 이와 같은 흐름이 터보기계의 출구에 부착되어 있는 원추 디퓨저에 유입되는 경우 아주 복잡한 흐름이 된다. 이 디퓨저를 설치하는 목적은 출구 부분에서 갖는 동압성분을 디퓨저내부에서 손실없이 정압으로 회복시키는 것에 있다. 선회류이 유입조건하에서 디퓨저의 정압특성에 관해서는 비교적 활발한 연구가 이루어지고 있다^{1)~2)}.

그러나, 유입류의 조건(레이놀즈 수, 난류 경계층 두께등)이 정해지면 정압회복율은 관로의 출구 조건과의 관계로부터 결정된다. 그래서, 정압회복의 상승과 하강의 근본 원인을 조사하기 위하여 관로 내부의 유동상태를 조사할 필요가 있다.

한편, 선회류에 관한 난류특성은 대부분이 원관에 관한 것^{3)~5)}이며, Azad에 의한 일련의 연구^{8),9)}가 디퓨저 단면내의 난류 특성에 대하여 비교적 상세하게 취급하고 있다. 그러나 이것은 선회류가 존재하지 않는 입구 조건에 관해 중점을 두고 있다. 상기와 같이 선회류를 입구 조건으로 하여 디퓨저의 난류

특성을 취급한 연구는 거의 없는 상태이다.

이러한 필요성에 의하여 본 연구에서는 정압 회복의 상승과 하강의 기구를 규명하는 일단계로서, 난류특성에 착안하여 선회류가 디퓨저에 유입했을 경우에 열선 유속계에 의하여 관내의 난류측정을 하여 정압회복율과 비교 검토를 하였다.

실험방법

실험은 전보⁶⁾와 같은 장치에서 하였고, 난류측정에 관하여는 공학적으로 가장 유효한 (예를 들면, 편각이 4도인 디퓨저는 7도 디퓨저에 비해 약 2배의 길이를 갖는다) 편각이 7도의 디퓨저에 한하여 실험하였다. 이러한 3차원 난류측정에 있어서는 열선 support 축 둘레에 열선을 회전시키는 방법⁷⁾을 사용하였다. 이 방법을 디퓨저내의 난류측정에 적용한 것을 다음에 간략히 설명한다.

우선, 열선 유속계의 좌표계를 Fig. 1에 나타낸다. 여기서 (x, y, z) 는 절대 좌표계이고, (ξ, η, ζ) 는 열선을 기준으로한 상대 좌표계 (Fig. 2)이다. 여기서 대문자는 평균성분이고 소문자는 변동성분을 나타낸다. 열선의 support 축에 대한 경사각을 α (본 실험에서는 $\alpha=45$ 도), support 회전 각도를 ψ 라고 하면 상대 좌표계는 절대 좌표계로 부터 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \xi &= x \cos \alpha \cos \psi - y \sin \alpha \\ &\quad - z \cos \alpha \sin \psi \\ \eta &= x \sin \alpha \cos \psi + y \cos \alpha \\ &\quad - z \sin \alpha \sin \psi \end{aligned}$$

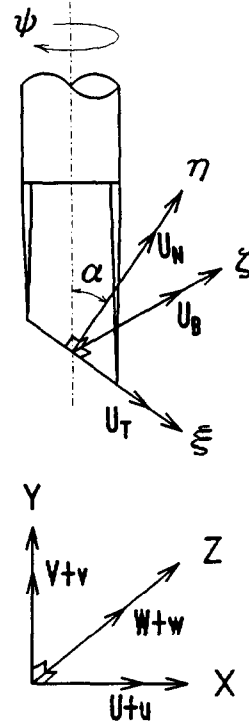


Fig. 1. Hot-wire coordinate.

$$\xi = x \sin \psi + z \cos \psi \quad (2)$$

이것은 직교 변환이기 때문에 속도성분도 변환되어,

$$\begin{aligned} U_N &= (V + v') \cos \alpha + \{ (U + u') \cos \psi \\ &\quad - (W + w') \sin \psi \} \sin \alpha \\ U_T &= - (V + v') \sin \alpha + \{ (U + u') \cos \psi \\ &\quad - (W + w') \sin \psi \} \cos \alpha \\ U_B &= (U + u') \sin \alpha + (W + w') \cos \psi \quad (3) \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있다.

열선이 감지하는 냉각속도 U_{eff} 는 U_N , U_T , U_B 의 상호 작용에 의한 것으로서, 각 방향에 대한 열선의 감도계수 h , k 를 도입함으로써 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$U_{eff}^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (4)$$

열선의 냉각속도는 열선의 검정에 의하여 출력전압 E 로 나타낼 수 있다. 즉,

$$U_{eff} = f(E) \quad (5)$$

이다.

또한 열선의 출력과 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(E) = [[(V + v') \cos \alpha + \{ (U + u') \cos \psi - (W + w') \sin \psi \} \sin \alpha]^2 + k^2 [- (V + v') \sin \alpha + \{ (U + u') \cos \psi - (W + w') \sin \psi \} \cos \alpha]^2 + h^2 \{ (U + u') \sin \psi + (W + w') \cos \psi \}^2]^{1/2} \quad (6)$$

위 식을 제공하여 시간 평균(-)을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \overline{f^2(E)} = & (\overline{U^2} + \overline{u'^2}) (\cos^2 \psi \sin^2 \alpha \\ & + k^2 \cos^2 \psi \cos^2 \alpha + h^2 \sin^2 \psi) \\ & + (\overline{V^2} + \overline{v'^2}) (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) \\ & + (\overline{W^2} + \overline{w'^2}) (\sin^2 \psi \sin^2 \alpha \\ & + k^2 \sin^2 \psi \cos^2 \alpha + h^2 \cos^2 \psi) \\ & + (\overline{UV} + \overline{u'v'}) (1 - k^2) \cos \psi \sin 2\alpha \\ & - (\overline{UW} + \overline{u'w'}) (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha \\ & - h^2) \sin 2\psi \\ & - (\overline{VW} + \overline{v'w'}) (1 - k^2) \sin \psi \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 열선 출력 전압을 평균 성분(E)과 변동 성분(e)으로 표시하면, 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\overline{f^2(E)} = (\overline{f(E)})^2 + \overline{f^2(e)} \quad (8)$$

여기서 평균성분에 관한 항을 삭제함으로써 다음과 같은 변동성분의 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \overline{f^2(e)} = & \overline{u'^2} (\cos^2 \psi \sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \psi \\ & \times \cos^2 \psi + h^2 \sin^2 \psi) + \overline{v'^2} (\cos^2 \alpha \\ & + k^2 \sin^2 \alpha) + \overline{w'^2} (\sin^2 \psi \sin^2 \alpha \\ & + k^2 \sin^2 \psi \cos^2 \alpha + h^2 \cos^2 \psi) \\ & + \overline{u'v'} (1 - k^2) \cos \psi \sin 2\alpha - \overline{u'w'} \\ & (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha - h^2) \sin 2\psi - \overline{v'w'} \\ & (1 - k^2) \sin \psi \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식들에 대하여 열선 회전각 ψ , 열선 경사각 α 를 변화시켜 얻어지는 연립방정식을 풀면 구하고자 하는 Reynolds응력 성분을 구할 수 있다. 본 연구에서 사용한 열선의 회전각도 ψ 는, $\alpha=45$ 도(경사형 열선)에 대해서는 $\psi=0, 30, 60, 90, 190, 225, 250, 27$ 도의 8회전을 사용했으며, $\alpha=90$ 도(I형 열선)에 대해서는 $\psi=90$ 도의 1회전 각도로서 전부 9회전 각도를 선택하여 측정을 행하였다. 이들의 회전각도는 디퓨저내의 흐름이 강한 선회류의 경우에도 열선의 prong(열선의 지지부)등의 영향이 전혀 발생하지 않는 각도이다.

그런데, 3차원 난류성분을 구하기 위하여서는 식(9)의 9개의 연립방정식을 풀지 않으면 안된다. 그러나, 이 상태만으로는 감도계수 h 와 k 가 미지수로 남게 된다. 이 감도계수는 식(4)와 Fig. 2에서 $\theta=0$ 도, $\Phi=0$ 도의 경우를 상각하면 각각 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

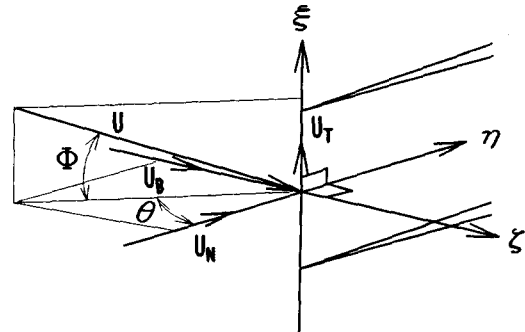


Fig. 2. Hot-wire coordinate of sensitivity coefficient.

$$\theta = 0^\circ : U_{eff}^2(\Phi) = U^2(0) (\cos^2 \Phi + k^2 \cdot \sin^2 \Phi) \quad (10)$$

$$\Phi = 0^\circ : U_{eff}^2(\theta) = U^2(0) (\cos^2 \theta + k^2 \cdot \sin^2 \theta) \quad (11)$$

위 식(10), (11)과 식(5)에서 감도계수 h , k 는 다음과 같이 된다.

$$k = \frac{1}{\sin\Phi} \left\{ \left(\frac{f(E(\Phi))}{f(E(0))} \right)^2 - \cos^2\Phi \right\}^{1/2} \quad (12)$$

$$h = \frac{1}{\sin\theta} \left\{ \left(\frac{f(E(\theta))}{f(E(0))} \right)^2 - \cos^2\theta \right\}^{1/2} \quad (13)$$

이와 같이 감도 계수는 θ , Φ 및 유속의 함수가 된다. 그래서 본 연구에서는 h 의 값은 $\theta=90^\circ$, $\Phi=0^\circ$ 일때, k 의 값은 $\theta=0^\circ$, $\Phi=90^\circ$ 일때의 값을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 디퓨저 손실

Fig. 1에 선회류의 강도 m_1 에 대한 디퓨저의 정압 회복율 C_p 를 나타낸다. 이 디퓨저의 성능 표시는 다음과 같은 정의식을 이용하였다.

$$C_p = \frac{P_{sc} - \bar{P}_{s1}}{\bar{P}_{d1}} \quad (14)$$

여기서, P_{sc} 는 정정실 정압, P_{s1} , P_{d1} 은 각각 디퓨저 입구 단면에서의 정압 및 동압의 유량 평균치를 나타낸다.

이 식(14)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$C_p = \frac{\bar{P}_{d1} - (\bar{P}_{d1} + \bar{P}_{s1}) + (\bar{P}_{tc} - \bar{P}_{dc})}{\bar{P}_{d1}} \\ = 1 - \frac{\bar{P}_{dc}}{\bar{P}_{d1}} - \frac{\bar{P}_{t1} - \bar{P}_{tc}}{\bar{P}_{d1}} \quad (15)$$

위 식(15)의 우변 제2항은 디퓨저 출구 직관부를 거쳐서 정정실로 유출하는 동압성분을 나타내고, 제3항은 입구 직관부로부터 디퓨저 출구직관까지의 전압 손실로서 열로 변하여 확산해 버리는 항을 나타낸다. 즉, 이들 2, 3항은 디퓨저로서는 손실을 나타내는 항목이다. 여기서, 식(15)의 정정실에서의 값(첨자c) 대신에 디퓨저의 각 단면(AR2, AR3, AR4: 디퓨저의 입구 직관과의 면적비

가 2, 3, 4로 되는 단면이다.)에서의 값을 대입해서 다음과 같은 P_{di}^* , P_{ti}^* 를 정의한다. 여기서, 첨자 i 는 디퓨저의 각 단면 AR2, AR3, AR4를 나타낸다.

$$1 - C_{pi} = P_{di}^* + P_{ti}^* \quad (i=2, 3, 4) \quad (16)$$

$$P_{di}^* = \frac{\bar{P}_{di}}{\bar{P}_{d1}} \quad (17)$$

$$P_{ti}^* = \frac{\bar{P}_{t1} - \bar{P}_{ti}}{\bar{P}_{d1}} \quad (18)$$

여기서, C_{pi} 는 AR1 단면으로부터 i 단면까지의 정압 회복율을 의미한다. 또한, 식(17), (18)은 각각 i 단면까지 정압으로 변환되지 못한 성분으로서, 디퓨저로서는 무효한 동압성분과 전압손실을 나타낸다. Fig. 4에는 AR4 단면에 대한 동압 손실 P_d^* 와 전압손실

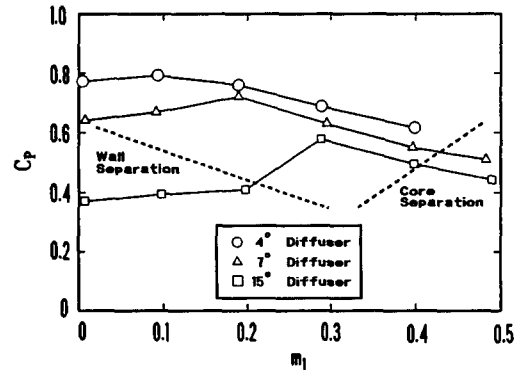


Fig. 3. Pressure recovery.

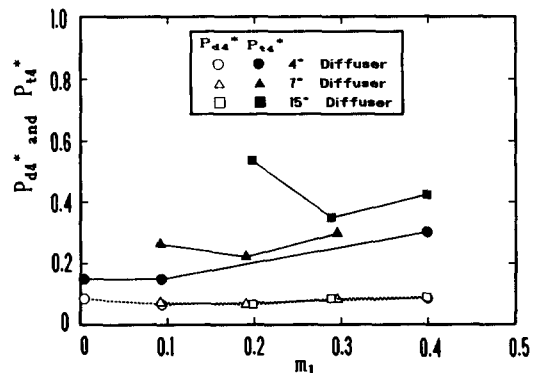


Fig. 4. Pressure loss (AR4).

P_t^* 를 나타낸다. 동압손실은 전 디퓨저손실 중의 약10% 이하이며, m_1 와 디퓨저의 편각 ϕ 의 영향을 크게 받는 것을 나타낸다. 또한, Fig.3과 비교해 보면 전압손실이 디퓨저의 정압 회복 성능을 크게 좌우하는 것을 나타내고 있다. 특히, 약한 선회류와 강한 선회류의 경우에는 전압손실이 큰 비중을 차지하고 있는 것을 보이고 있다. 즉, 디퓨저 내부의 평균 유동장에서 명확한 것처럼 선회류의 강약에 의하여 생기는 벽면의 박리와 중심부의 역류로 인한 손실이 크게 작용하기 때문이다.

2. 단면내의 난류특성

Fig. 7, 8, 9, 10에 편각이 7도인 디퓨저의 각 단면에 대한 난류 에너지($k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$)의 분포를 나타낸다. 선회류의 강도는 최대 정압 회복율을 나타내는 m_1 이 약 0.2인 경우에 한하여 실험을 행하였다. 그림의 종축은 입구 단면의 축방향 속도로서 무차원한 값을 나타내며, 횡축은 각 단면내의 반경 위치를 나타낸다. 우선, Fig.7의 디퓨저 입구(AR1)에서의 난류에너지는 반경위치 0.22 이상의 부분에서는 아주 작은 값을 가지지만, 중심부에서는 급격히 큰 난류성분을 가지고 있는 것을 나타낸다. 이것은 Fig.5,6의 전압 분포와 관련지을 수 있다. 즉, Fig.5는

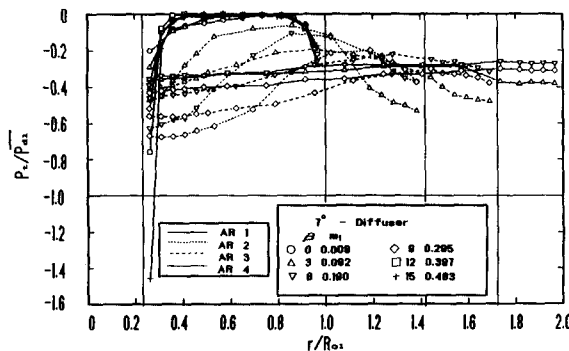


Fig. 5. Total pressure with 28 core.

디퓨저의 중심부에 직경 28mm의 심봉을 삽입시켰을 경우에 대한 전압분포를 나타낸다. 이 경우는 중심부가 외벽에 비하여 전압이 조금 작은 정도로서, 벽에 의한 마찰효과로 전압이 조금 작은 일반 관로계의 유동 패턴과 거의 동일하다. 그러나, Fig.6과 같이 심봉을 삽입하지 않은 경우에는 디퓨저의 중심부에서 아주 급격한 전압 하강을 동반하고 있다. 즉, 이 부분에서는 Fig.7과 같이 중심부에서 큰 흐름의 변동이 발생하는 것을 말해준다. 그러나, 유로 면적이 작은 중심부에서 조금 큰 난류 에너지가 발생하지만, 대부분의 유량을 지배하는 외벽 근처에서는 난류 에너지가 작기때문에 입구 단면에서의 전체 난류성분은 비교적 작다. 이러한 유입류가

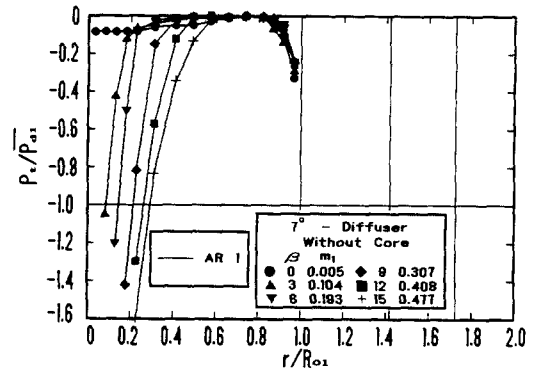


Fig. 6. Total pressure without core.

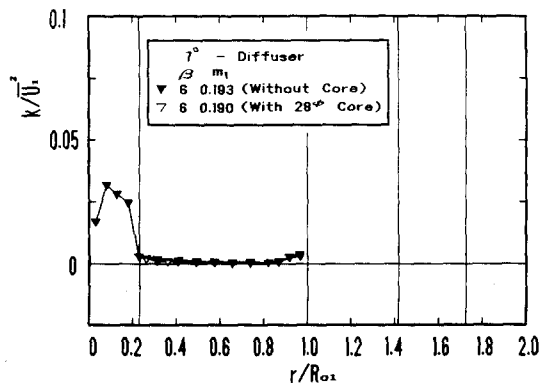


Fig. 7. Turbulence energy (AR1).

디퓨저부의 확대관로(Fig. 8의 AR2)에 유입 되면 급격히 큰 난류성분이 발생한다. 또한, 심봉의 삽입의 차에서 보면 심봉을 삽입하지 않은 경우가 난류 에너지가 크다. 이러한 것은 심봉을 삽입하지 않은 경우가 정압 회복율이 저하⁶⁾되는 것과 대응한다. 즉, 난류 에너지의 증가는 식(18)의 전압손실을 크게 만들기 때문에 정압 회복율을 감소시키는 결과로 된다. 이와 같이 디퓨저의 상류부분에서의 급격한 난류 에너지는 디퓨저 하류(Fig. 9, 10의 AR3과 AR4단면)로 흐름에 따라서 점점 작아진다. 즉, 심봉의 유무에 무관하게 하류에서는 안정된 유동장을 이루는 것을 나타낸다. 또한, 축방향의 정압 분포⁶⁾를 보면 AR2 단면 부근까지의 상류에서 압력회복의

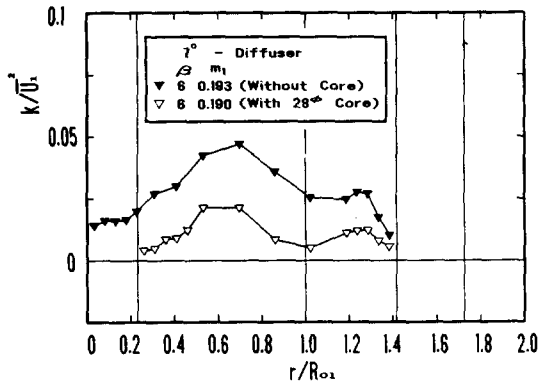


Fig. 8. Turbulence energy (AR2).

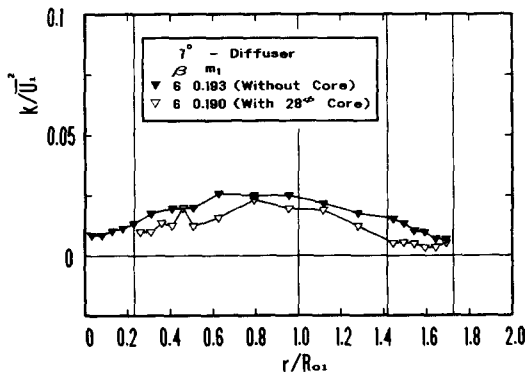


Fig. 9. Turbulence energy (AR3).

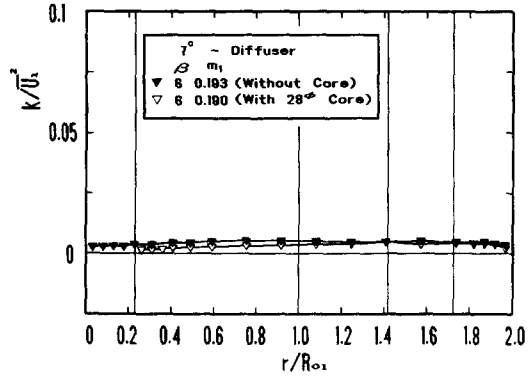


Fig. 10. Turbulence energy (AR4).

대부분이 이루어 지며, 난류성분도 이부분에서 가장 활발히 생성되므로 보다 고효율의 정압회복 특성을 이루기 위해서는 이 상류부분의 난류성분의 제어가 대단히 유효한 방법이 된다. 즉, 과거의 디퓨저 효율상승의 방법은 입구에서의 유입조건에 관심이 많았지만, 위와 같이 내부단면내의 난류 측정과 압력회복 손실 인자와의 특성에서 보다 효율 높은 디퓨저의 설계를 할 수 있다.

요 약

본 연구에서는 정압 회복의 상승과 하강의 메카니즘을 구명하는 방법으로, 선회류가 유입시 디퓨저 단면내의 난류성분과 정압 회복율과의 관계로부터 다음의 결과를 얻었다.

(1) 디퓨저의 정압 회복 손실은 유입 유체가 갖는 동압이 정압으로 변환되지 않고 동압 성분의 에너지가 유출함에 기인하는 손실과 벽면 마찰, 혼합 손실 등에 의한 전압손실로 구분된다. 이 중에서 후자인 전압손실이 디퓨저의 성능을 크게 좌우하고 이것을 제어함으로써 보다 고성능을 갖는 디퓨저가 실현될 수 있다.

(2) 디퓨저의 손실중에서, 동압의 유출에 의한 손실은 선회류가 강도에 무관하게 약 10%이하이다.

(3) 디퓨저의 중심부에 적당한 크기를 갖는 심봉을 삽입함으로써 높은 정압 회복율이 얻어지는 것은, 관로내의 난류성분 감소로 인한 전압손실이 대폭적으로 감소하기 때문이다.

(4) 난류성분의 제어가 보다 강력한 디퓨저의 정압 회복 상승을 위한 방법중의 하나이다.

참고문헌

- 1) A. T. McDonald (1970): Effects of Swirling Inlet Flow on Pressure Recovery in Conical Diffuser. J. Fluid Mech. Vol. 19, 193-209.
- 2) N. E. A Wirasinghe (1978): Changes in Conical Diffuser Performance by Swirl Addition. Aeronautical Quarterly The City Univ. London., Aug. 131-142.
- 3) K. S. Janik (1973): Experiments on Swirling Turbulent Flows. J. of Fluid Mech. Vol. 60, 665-687.
- 4) M. Samnet (1988): Mean Value Measurement of a Turbulent Swirling-Jet. J. of AIAA Vol. 26, May., 619-620.
- 5) P. A. Dellenback (1988): Measurement in Turbulent Swirling Flow Through an Abrupt Axisymmetric Expansion. J. of AIAA Vol. 26 Jun. 669-681.
- 6) 정효민·고대권·양정규(1992): 유입 선회류에 대한 원후 디퓨저내의 속도 분포와 정압회복 특성에 관한 연구. 한국어업기술학회지, 28(2).
- 7) A. Michael (1978): An Improved Method for Determining the Flow Field of Multidimensional Flows of Any Turbulence Intensity. DISA Jan.
- 8) R. S. Azad (1973): Turbulence in a Conical Diffuser with Fully Developed Flow at Entry. J. of Fluid Mech. Vol. 57. 603-622.
- 9) R. S. Azad (1989): Turbulent Flow in a Conical Diffuser. Phys. Fluid A1 (3) Mar. 564-573.