

실린더 후류를 이용한 2차원 디퓨저 성능개선

The improvement of Two-Dimensional Subsonic Diffuser Performance Using the Turbulent Wake Caused by Cylinder

김세일*
동국대학교

초 록

본 연구에서는 디퓨저의 압력회복을 높이기 위해 디퓨저 입구에 실린더를 설치하여 후류가 압력회복에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 2D-Incomp-2.1-P 해석자를 이용하여 속도, 압력에 따른 유동가시화를 통해 내부유동을 분석하였고, 압력회복계수를 비교하여 디퓨저 입구에 설치된 실린더의 후류가 디퓨저 성능에 어떤 영향을 주는지 비교하였다. 그결과 실린더를 설치하였을 때 확대부에서의 박리영역이 더 작아졌고 압력회복계수가 더 높아졌다.

Key Words : Diffuser(디퓨저), Turbulent Wake(후류), Pressure Recovery(압력회복), Pressure Loss(압력손실), Separation(박리), Internal Flow(내부유동)

1. 서 론

디퓨저(diffuser)는 유동의 운동에너지를 압력으로 변환시키는 장치로 디퓨저 입구로 들어온 유동은 확대유로를 통과하면서 유동의 운동에너지를 감소하고, 압력수두는 증가하게 된다. 디퓨저의 확대각이 크면 유속의 감소는 커질 수 있으나 확대부에서의 박리영역이 증가하게 되어 큰 압력손실이 일어나게 된다. 유동의 박리는 압력손실(pressure loss)을 일으키고 박리유동의 불안정성으로 인한 소음과 진동의 주 원인이 될 수 있다. 디퓨저 유동에서와 같이 감속유동의 경우 확대부에서 박리(separation) 등에 의한 압력손실이 발생하게 되므로 디퓨저의 효율은 100%가 되지 않는다.

이와 관련하여 디퓨저의 효율을 향상시키기 위한 많은 연구가 선행되었다. Sensoo, Y⁽²⁾에 의하면 와류 발생기(vortex generator)를 디퓨저 입구에 설치하면 유동방향의 와류를 형성시켜 경계층과 주 유동 사이에 운동량 교환을 촉진하게 되어 디퓨저 효율을 향상시킬 수 있다. 또 많은 연구자들은 디퓨저 확대부에서 발생하는 유동박리는 디퓨저 입구에서 속도분포나 난류강도에 영향을 받는 것으로 보고하였다. 이와 관련하여 Hoffmann, J⁽⁶⁾은 디퓨저 입구에 난류격자망 등을 설치하게 되면 2차원 디퓨저의 성능을 개선할 수 있다고 보고하였다.

이러한 연구 결과들을 종합적으로 고찰하면, 아음속 디퓨저의 확대각이 주어지는 경우 디퓨저 입구에서 어떤 난류강도를 갖는 특정 속도분포를 만들어 주면 디퓨저의 압력회복에 도움이 될 것으로 판단되며 이와 관련하여 김태호 등⁽¹⁾은 디퓨저 입구에 실린더를 설치하여, 실린더의 직경과 위치 변화가 디퓨저의 압력회복에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 하지만 앞선 연구들에서는 디퓨저 입구에 실린더를 설치하는 것 자체가 압력회복에 어떤 영향을 미치는지와 관련하여 이에 대한 근본적인 분석이 빠져있다.

본 연구에서는 디퓨저 입구에 직경 d 를 가지는 원형실린더를 설치하여 실린더 하류에서 발생하는 후류(turbulent wake)에 의한 디퓨저의 내부유동 변화와 후류가 2차원 아음속 디퓨저의 압력회복(Pressure Recovery)에 어떠한 영향을 미치는지 조사하고 실린더 유무에 따른 디퓨저 성능을 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 격자생성 및 경계조건

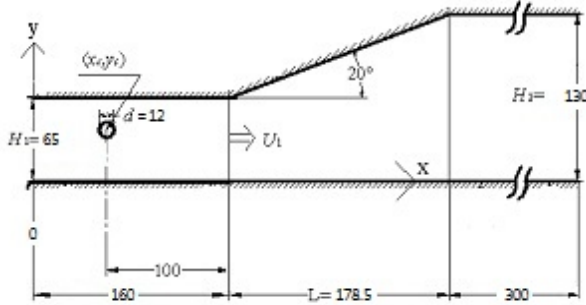


Fig. 1. 2-D 디퓨저 개략도

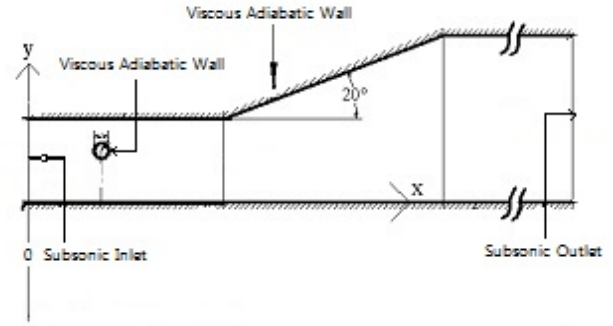


Fig. 2. 2-D 디퓨저 경계조건

Fig. 1 에서는 본 연구에 적용된 2차원 디퓨저의 개략도를 나타내었다. 그림에서 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르며, 디퓨저의 입구를 원점($x=0$)이라 가정하였다. 본 연구에서는 디퓨저 확대부로부터 상류 $x=160\text{mm}$ 의 위치까지 일정 단면적의 유로(높이 $H_1=65\text{mm}$)를 설치하였으며, 완전히 발달한 유동이 디퓨저로 유입되도록 속도분포 조건을 입구조건에 주었다. 또 디퓨저의 확대부는 반각 $\theta=20^\circ$ 로 되어 있으며, 확대부의 길이는 178.5mm 이다. 디퓨저 출구에는 길이 300mm 의 단면적이 일정한 유로(높이 $H_2=65\text{mm}$) 설치하였다. 이러한 디퓨저 체원은 문헌⁽⁷⁾의 실험장치에 근거한 것이며, 실험에서 디퓨저의 폭은 실린더의 길이와 동일한 260mm 이다. 디퓨저 입구에서 후류를 발생시키기 위하여, 디퓨저 확대부의 상류 $x=60\text{mm}$ 의 위치에 직경 $d=12\text{mm}$ 를 가지는 실린더를 설치하였다.

2D-Incomp-2.1-P 해석자를 이용하기 위해서는 특성길이가 1이 되도록 격자를 제작하여야 하므로 본래의 디퓨저와 상사조건이 일치하도록 길이를 일정비율로 조정하여 디퓨저 격자를 제작하였다.

Fig. 2 에서는 본 연구에 적용된 경계조건을 나타내었다. 경계조건의 타당성을 위해 디퓨저 상류 경계에 Subsonic Inlet 조건을, 하류 경계에 Subsonic Outlet 조건을 주고 실린더와 벽면은 Viscous Adiabatic Wall 조건을 주었다.

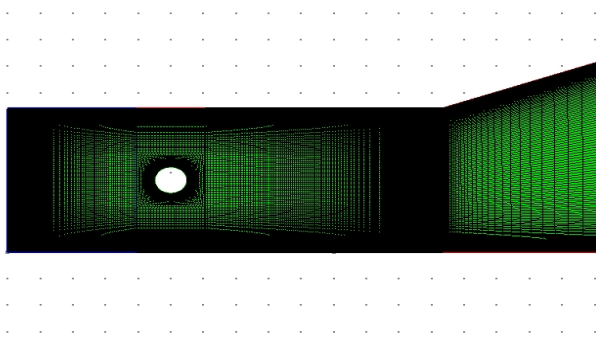


Fig. 3. 2-D 디퓨저 입구 격자구성

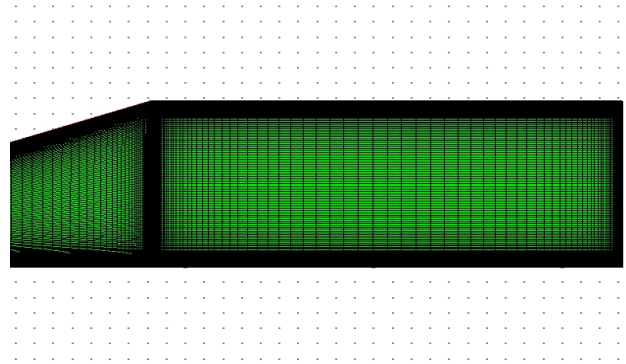


Fig. 4. 2-D 디퓨저 출구 격자구성

Fig. 3, 4 에서는 본 연구에 사용된 격자구성을 나타내었다. 계산에 사용된 격자점은 약 59,300개 정도로, 유동장내에 속도변화가 비교적 큰 부분 즉 실린더 주위와 경계층 영역에 격자점을 집중 하였다.

디퓨저 입구에 후류를 발생시키기 위하여, 디퓨저 확대부의 상류 $x=60\text{mm}$ 의 위치에 직경 $d=12\text{mm}$ 를 가지는 실린더를 설치하였다. 본 연구에서는 실린더의 중심($x=60\text{mm}$, $y=32.5\text{mm}$)을 기준으로 특정 위치에 설치하여, 실린더의 유무가 디퓨저의 앞력회복 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Table 1에는 본 연구에 적용한 실린더 직경 d 와 위치(x , y) 그리고 디퓨저 입구 ($x=0$)에서 단면 평균유속 U_1 의 값, 실린더 직경을 기준으로 한 레이놀즈수를 정리하였다.

Table 1 실린더 및 유동 조건

실린더 직경(d)	실린더 위치(x, y)	평균유속(U ₁)	레이놀즈수
d=12mm	(60, 32.5) 단위mm	0.132m/s	8800

3. 결과

3.1 결과 값의 신뢰성

본 연구에서 유동은 2D_Incomp_2.1_P Solver를 이용하여 계산하였다. 유동조건은 Flow Type=Turbulent flow, Re=8800, Unsteady, Total Interaction=3000, CFL=1로 동일하게 적용하였다. Total Interaction 값의 크기를 1000에서 조금씩 높여나가며 결과 값을 분석한 결과 일정 시간까지는 디퓨저 내부의 유동이 지속적으로 불안정한 변화를 나타내지만 특정 시간이후부터는 유동이 점차 Steady화 되어가는 양상을 나타내었다. coefhist.rlt의 그래프도 초기에는 큰 진폭으로 진동하다가 특정 시간이후부터는 진폭이 0으로 수렴하여 직선의 형태를 나타내었다. 따라서 Total Interaction 값을 충분히 크게 주어 안정화된 상태에서의 결과 값을 얻어 유동을 분석하였다.

3.2 유동가시화를 통한 비교

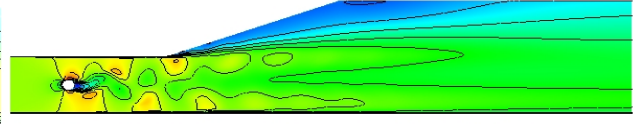
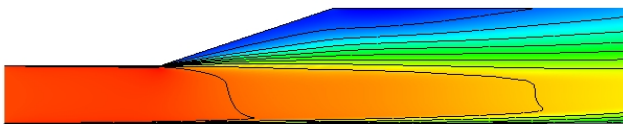
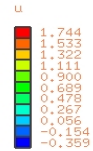
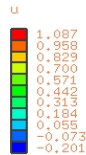


Fig. 5. 실린더가 없는 디퓨저 속도분포

Fig. 6. 실린더가 설치된 디퓨저 속도분포

Fig. 5, 6에는 실린더가 설치되지 않은 디퓨저와 입구에 실린더를 설치한 디퓨저의 속도에 따른 유동가시화 그림을 나타내었다. 그림으로부터 실린더가 없는 경우 확대부에서 발생하는 매우 큰 박리영역은 실린더를 설치함으로써 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 그림에서와 같이 실린더를 설치함으로써, 실린더로부터 발생한 와류가 디퓨저 확대부의 난류강도를 증가시켜 확대부에서 발생하는 박리를 지연시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

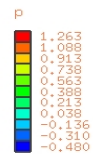


Fig. 7. 실린더가 없는 디퓨저 압력분포

Fig. 8. 실린더가 설치된 압력분포

Fig. 7, 8에는 실린더가 설치되지 않은 디퓨저와 입구에 실린더를 설치한 디퓨저의 압력에 따른 유동가시화 그림을 나타내었다. 그림으로부터 디퓨저 입구에 실린더를 설치함으로써 디퓨저 내부의 전체적인 압력분포가 높아지는 효과가 있음을 알 수 있다.

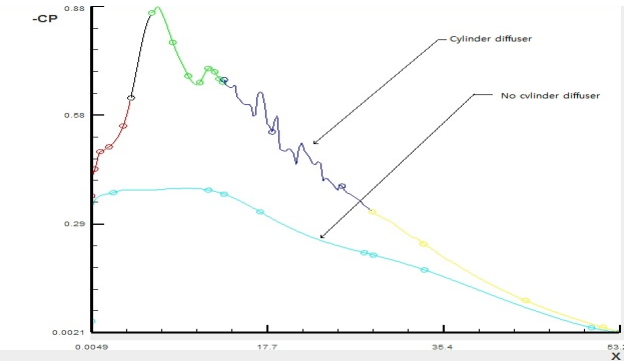


Fig. 9. 디퓨저 바닥부분 압력계수 비교

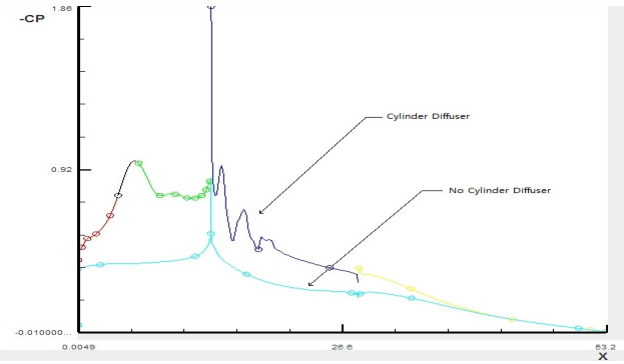


Fig. 10. 디퓨저 천정부분 압력계수 비교

Fig. 9.는 디퓨저 입구를 원점으로 위치변화에 따른 디퓨저의 바닥부분의 -압력계수 변화를 나타내었다. Fig. 10.은 디퓨저 입구를 원점으로 위치변화에 따른 디퓨저 천정 부분의 -압력계수 변화를 나타내었다. 그래프의 y축 값은 -압력계수(-C_p)이고 x축 값은 디퓨저 입구를 원점으로 하는 축방향 거리이다. Fig. 9, 10를 통하여 디퓨저 입구에 설치된 실린더가 압력회복 특성에 미치는 영향을 비교할 수 있다.

실린더가 없는 디퓨저의 경우 Fig. 10에서 디퓨저 천정부분의 압력변화는 디퓨저의 확대부에서 급격히 낮아진 후 다시 서서히 증가한다. Fig. 9에서 디퓨저의 바닥부분의 압력변화는 확대부 전까지는 일정하다가 확대부 이후에는 서서히 증가한다.

디퓨저 입구에 실린더가 설치된 경우 Fig. 10에서 천정부분의 압력변화는 실린더 주변과 확대부에서 다소 감소하고 나머지 영역에서는 거리에 따라 서서히 증가한다. Fig. 9에서 디퓨저의 바닥부분의 압력변화는 실린더 주변에서 급격히 뒤쪽으로 갈수록 거리에 따라 서서히 증가한다. Fig. 9, 10의 -C_p 그래프를 보면 디퓨저 입구에 실린더를 설치할 때 거리에 따른 압력계수의 변화가 더 크게 일어남을 알 수 있다.

3.3 디퓨저 성능

비압축성 유동의 경우 디퓨저의 성능은 압력회복계수를 통하여 비교할 수 있다. 압력회복계수는 $C_p = (P_3 - P_2) / (\frac{1}{2} \rho_{\infty} u_{\infty}^2)$ 을 통하여 구할 수 있다. 여기에서 P₃은 출구에서의 압력, P₀₁은 입구에서의 압력, P₁은 목에서의 압력이다. 각 부분에서의 압력 값은 수치해석을 통해 얻은 압력의 평균값을 사용하였다. 결과 값은 무차원화 된 값이므로 $p = \rho_{\infty} u_{\infty}^2 p^* + p_{\infty}$ 식을 이용하여 변환하여 압력 값을 얻었다.

Table 2 디퓨저 성능비교

실린더가 없는 디퓨저의 압력회복계수	입구에 실린더가 설치된 디퓨저의 압력회복계수
0.14	0.4314

Table 2에서 디퓨저 압력회복계수를 비교하면 입구에 실린더를 설치했을 때 압력회복계수가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 실린더 후류에서 일어난 와류가 확대부에서의 박리를 지연시켜 박리영역이 작아지게 하여 결과적으로 압력손실도 줄어드는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2차원 디퓨저 입구에 원형실린더를 설치하여 실린더 하류에서 발생하는 후류가 압력회복에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그 결과 실린더 후류에서 발생한 와류가 난류강도를 증가시켜 디퓨저 확대부에서 박리를 지연시켜 박리영역을 감소시키는 사실을 확인하였다. 압력회복계수를 구한 결과 실린더를 설치하였을 때 압력회복계수의 크기가 더 크게 나타났다. 이를 바탕으로 실린더의 설치가 디퓨저의 압력손실을 감소시킨다는 사실을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 디퓨저 입구에 설치된

원형실린더가 디퓨저 성능향상에 미치는 영향을 구체적으로 확인할 수 있었으며, 디퓨저 입구에 설치된 실린더 자체가 압력회복에 미치는 영향에 대한 구체적인 설명 없이 실린더 직경과 위치에 따른 성능변화에만 초점을 맞췄던 기존 논문들의 논리적 문제점을 상당수 보완하였다.

본 연구의 한계점은 디퓨저 입구에 설치된 실린더 모형이 원형실린더에 한정되었다는 점이다. 정사각형, 마름모 등 실린더의 모양에 따라 후류에 형성되는 와류의 모양도 다르고 난류강도의 크기도 다르기 때문에, 실린더의 모양을 바꿔가며 디퓨저의 성능을 비교해 나간다면 가장 이상적인 실린더의 형상을 찾을 수 있을 것이다. 이후에 직경과 위치를 변경해가며 최적의 값을 찾아나가는 방향으로 나아가야 할 것이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김태호, 윤복현, 오대근, 김희동, 2004, “실린더 후류를 이용한 2차원 디퓨저 성능개선에 관한 수치해석적 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, Vol.2004 No.4, 1720-1725
- (2) Senoo, Y. and Nishi, M., March 1974, “Improvement of the performance of Conical Diffusers by Vortex Generators,”ASME Jour. Fluids Eng., Vol. 96, pp. 4-10.
- (3) Wolf, S. and Johnston, J. P., 1969, “Effects of Nonuniform Inlet Velocity Profiles on Flow regimes and Performance in two dimensional Diffusers.”ASME Jour. Basic Eng., Vol. 91, pp. 462-474.
- (4) Kaiser, J. F. and McDonald, A. T., 1980, “Effect of Wake-Type Nonuniform inlet velocity Profiles on First Appreciable Stall in Plane-Wall Diffusers,”ASME Jour. Fluids Eng., Vol. 103, pp. 283-289.
- (5) Sullerey, R.K., Ashock, V. and Shantharam, K.V., 1992, “Effect of Inlet Flow Distortion on performance of Vortex Controlled Diffuser,”ASME Jour. Fluid Eng., Vol. 114, pp. 191-197.
- (6) Hoffmann, J. A. and Gonzalez, G., 1984, “Effect of Small-Scale, high intensity inlet Turbulence on Flow in a two-Dimensional Diffuser,”ASME Jour. Fluids Eng., Vol. 103, pp. 283-289.
- (7) Mochizuki, O., Ishikawa, H. and Kiya, M., 2001, “Improvement of a Stalled-Diffuser Performance by a Turbulent Wake,”Proceedings of the Fifth World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Vol. 3, pp. 1879- 1884.