

평판형 디퓨저의 성능해석에 관한 실험 및 수치해석

· 조대환*, 이철재**, 배석태**, 김성동***

Experimental and Numerical Study on Performance Analysis of a Planar Diffuser

Dae-Hwan Cho, Ceol-Jae Lee, Seok-Tae Bae, Seong-Dong Kim

* 목포해양대학교 기관공학부
** 동명대학
*** 한국선급

Abstract : In wide angle diffuser, the cross-sectional area increases so rapidly that separation can be avoided only by using boundary layer control. In this study, an experimental and numerical study is performed on performance of a diffuser with guide damper. A series of measurements were carried out to investigate the characteristics of diffuser for different divergence angle($\phi=7^\circ$, 10.5° and 14°) of guide damper and angle of $\phi=10.5^\circ$ was through to be the best among three cases. Judging from the results, guide damper can be used as an effective means of improvement for diffuser performance.

Key words: Planar Diffuser(평판형 디퓨저), Ventilation(환기), Divergence Angle(확산각)

1. 서론

선박의 펌프실이나 기관실 등의 대형공간에서의 공조 및 환기를 위해서는 외부의 신선한 공기를 필요한 공간에 공급하여야 하며 이때 사용되는 설비중의 하나가 디퓨저이다. 공조설비를 경제적으로 하기 위해서는 덕트 배관 등을 가능한 줄일 수 있도록 하여야 하며, 디퓨저는 넓은 면적의 대상공간에 필요한 만큼의 공기를 배분할 수 있어야 한다. 이러한 환기용 디퓨저는 덕트의 연결부 중심선상의 제트중심부 유속은 빨리 감소하고 제트의 폭이 넓어져서 넓은 영역에서 균일한 유동을 얻는 것이 매우 중요하다.

Osipov 등^[1]은 광각 디퓨저에서 유동단면적의 급속한 증가로 인한 유동의 박리를 막기 위하여 벽면에 선회류를 공급하여 성능이 향상되는 결과를 얻었다. Jeong 등^[2]은 자유와형의 선회

류가 원추디퓨저로 유입하였을 때 정압회복 성능을 검토하고 디퓨저 벽면 및 관로 중심부에 대한 압력변동과 단면내의 난류강도를 측정하였다. 그리고 디퓨저의 중심부에 심봉을 설치함으로써 높은 정압회복율이 얻어짐을 보였다. Kim 등^[3]은 2차원 광각 디퓨저 내에 유동방향으로 경사진 쇄기형 스크린을 설치함으로써 디퓨저의 성능향상을 도모하고 저항계수가 일정할 때 입구의 경계층 특성변화는 압력손실계수보다 압력회복계수에 많은 영향을 미치는 결과를 제시하였다. 그리고 다른 흐름조절장치와 비교를 통해서 박리를 제어하기 어려운 확산각과 면적비를 갖는 디퓨저의 박리를 제어할 수 있음을 보였다. Lee 등^[4]은 직경 150mm의 원형관에 6개의 선회익을 설치하고 선회익의 폭과 선회익각을 변경하여 선회제트유동에 관한 실험을 하였다. 선회익각이 60° 인 경우 실제 환기에 가장 많이 적용되는 디퓨저 출구로부터 3m

지점에 균일한 유속분포가 나타난 결과를 보이고 있다. 그러나 선회발생기의 통과에 따른 압력손실이 선회수의 제곱에 비례하여 증가하므로 강선회를 사용하는 경우 이러한 점이 고려되어야 한다. Johnston^[5]은 수치계산을 이용한 디퓨저의 설계 기법 중 UIM(Unified Integral Method)와 관련된 연구결과를 종합하여 체계적으로 기술하고 있다. 평판형 디퓨저의 경우 $AR(W_2/W_1)=2\sim 4$, $N/W=5\sim 15$ 를 최적의 설계 조건으로 추천하고 있으며, Childs 등^[6]의 문헌을 이용하여 $2\theta=10^\circ\sim 20^\circ$ 를 갖는 디퓨저의 정압회복률과 관련된 내용을 UIM의 계산결과와 비교 검토하였다.

이와 같이 지금까지의 연구는 유입조건에 따른 정압회복 성능에 관한 개별적인 인자의 영향 평가에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나 공조계통에 사각덕트가 주로 사용되고 있고 면적비가 큰 디퓨저의 활용도가 높으므로 확산각 $2\theta=30^\circ$ 이상의 평판형 광각 디퓨저의 개발이 필요하다. 이 연구에서는 사각덕트방식의 환기용 디퓨저를 설계하기 위한 기초자료로서 안내댐퍼의 각도에 따른 광각디퓨저의 성능을 조사하였다. 그 결과 안내 댐퍼의 각도가 10.5° 일 때 가장 우수한 성능을 나타내었다.

2. 수치해석

2.1 이론 및 계산조건

디퓨저내의 유동특성은 일반 덕트와는 달리 벽면근처에서 난류의 평형상태를 이루지 못하므로 벽 경계조건으로서 표준 $\kappa-\epsilon$ 모델의 벽함수를 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 알려져있다^[7]. 수치계산에는 경계층 유동이나 원형덕트에서의 유동과 같은 발달된 유동장의 특성을 기초로 개발된 Launder와 Sharma 난류 모델을 채택하였다. 지배방정식의 이산화를 위한 격자계의 구성은 엇갈림 격자계를 채택하였다. 엇갈림 격자계에서 스칼라변수는 격자점들의 중앙에 속도점들은 격자점들 사이에 있게 된다. 이러한 격자계를 바탕으로 각 변수에 해당하는 검사체적에 대해 지배방정식을 적분하여 이산화 시키는 유한체적법을 사용하였다. 대류항 및 확산항의 차분기법은 Hybrid Scheme을 사용하였으며 알고리즘은 SIMPLE이다.

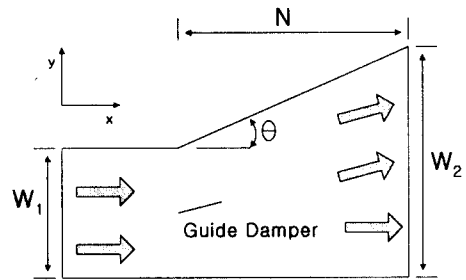


Fig.1 Schematic diagram of diffuser with guide damper

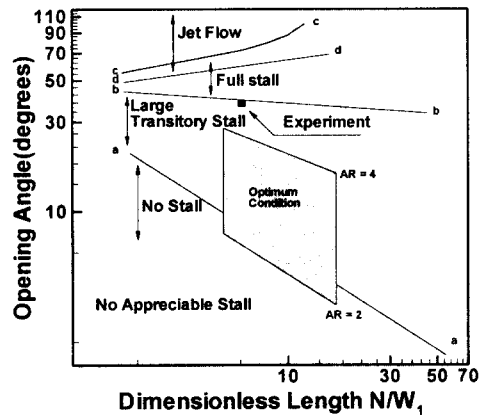


Fig. 2 Planar diffuser flow regime map

그림1은 수치계산에 적용된 유동장을 개략적으로 나타내고 있다. 디퓨저의 형상은 입구 측의 높이(W_1) 30mm, 디퓨저의 길이(N) 190mm 그리고 확산각은 20° 이다. 입출구의 면적비는 3.7이고 안내 댐퍼의 편각 θ 는 7° , 10.5° 및 14° 의 세 종류이다. 입구조건으로 디퓨저의 상류에는 충분히 긴 덕트가 연결되어 있다고 가정하고 사각덕트에서 완전히 발달한 유동을 계산한 후 그 결과를 사용하였다.

출구에서는 유량이 유지될 수 있도록 하였으며 수렴조건으로 연속방정식의 잔류량이 기준량 10^{-3} 을 넘지 않도록 주었다.

그림2는 확산각과 면적비에 따른 2차원 디퓨저의 표준설계 영역^[8]을 나타낸다. 확산각 $2\theta=40^\circ$, 면적비 3.7인 디퓨저의 경우 선 a-a와 선 b-b중간영역인 실속영역의 가장 상부에 놓

이게 되므로 디퓨저 성능이 극도로 저하되어 환기용 디퓨저로서 사용되지 않는 조건이다. 그러나 안내 댐퍼를 적절한 편각으로 설치할 경우 디퓨저 내부의 흐름이 두 개의 영역으로 분할된다. 따라서 디퓨저 내부의 설치된 안내댐퍼의 편각은 유동특성에 큰 영향을 미치게 된다.

2.2 수치해석 결과의 고찰

평판형 디퓨저의 경우 $AR(W2/W1)=2\sim4$, $N/W=5\sim15$ 를 최적의 설계조건이며 확산각 $\theta=20^\circ$ 이하로 제작되어야 실속 등과 같은 문제를 피할 수 있는 것으로 알려져 있으며 이에 관한 실험 및 수치해석 결과가 발표되고 있다. Johnston^[4]은 수치계산을 이용한 디퓨저의 설계 기법 중 UIM(Unified Integral Method)와 관련된 연구결과를 종합하여 체계적으로 기술하고 있으며 하부면의 확산각 $\theta_L = 0$, 상부면의 확산각 $\theta_H = 8.8^\circ$, $N/W1 = 10$ 을 갖는 디퓨저를 대상으로 시험결과와 비교하고 있다.

수치계산의 전체적인 합리성을 보기 위하여 디퓨저의 벽을 따라서 계산한 압력계수의 변화를 그림 3에 나타내었고 Johnston^[4]의 결과와 비교하였다.

그림 4는 안내댐퍼가 없는 경우에서 축방향의 거리에 따른 속도분포이다. $x/W1=1.7$ 의 위치에서도 역압력구배에 의한 역방향 흐름이 나타나고 있고 출구 측으로 갈수록 그 크기가 증가하고 있다. 역압력구배가 커지게 되면 박리가 발생하며 이러한 유동의 박리는 디퓨저의 성능을 저하시키게 된다.

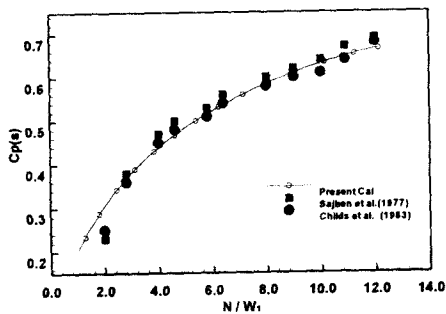


Fig. 3 Comparison of pressure recovery coefficient in planar diffuser

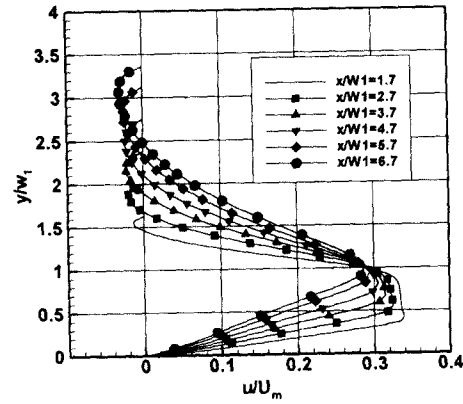
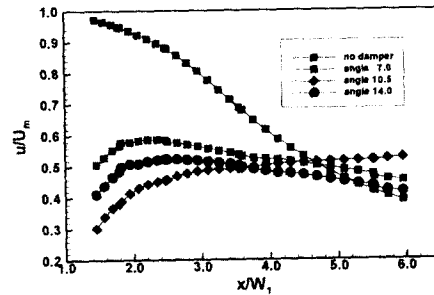
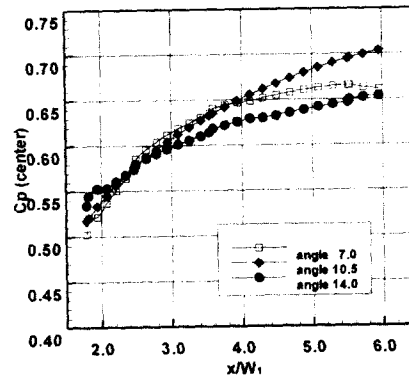


Fig. 4 Velocity profile without guide damper



(a) Velocity profile



(b) Pressure recovery coefficient

Fig. 5 Characteristics of planar diffuser in center line

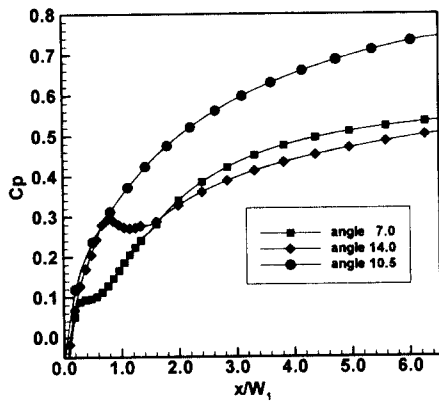


Fig. 6 Pressure recovery coefficient

그림 5는 디퓨저에 설치된 안내댐퍼의 하반부의 위치($x/W_1 = 4.0$)에서부터 디퓨저의 출구까지 중앙선상에서 안내댐퍼의 각도에 따른 속도와 압력의 분포를 보이고 있다. 안내댐퍼가 없는 경우에는 출구로 갈수록 급격한 속도의 감소를 보이고 있다. 이것은 유동의 중심축이 하부면에 근접하여 있고 그림2에 나타난 바와 같이 디퓨저의 확산 성능이 크게 저하되기 때문이다. 그림5(a)에서 안내댐퍼의 편각이 7.0과 14.0의 경우에는 $x/W_1 = 4.0$ 을 전후하여 속도 분포가 감소하고 있다. 이것은 설치된 디퓨저의 내부유동이 안내댐퍼에 의해 효율적으로 분할되지 못하여 국부적으로 면적비가 증가한 효과를 보이는 것으로 추정된다. 여기에 관해서는 차후에 여러 레이놀즈수에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 편각 $\theta = 10.5^\circ$ 의 경우 디퓨저의 내부압력은 확산효과로 서서히 증가하는 반면 벽면압력은 입구에서 급증한 후 출구로 갈수록 중심압력과 비슷한 값을 보였다. 그림 6은 안내댐퍼의 편각의 변화에 따른 벽면압력회복계수의 변화를 나타낸다. 안내댐퍼의 편각이 10.5° 인 경우에서 가장 우수한 결과를 보이고 있다.

3. 실험

3.1 실험조건 및 PIV계측

광각 디퓨저와 같이 강한 역압력구배가 형성

되는 유동에 대한 수치해석으로는 디퓨저 내부에 난류에너지의 생성, 확산, 소멸을 합리적으로 예측하기가 어렵다. 특히 디퓨저의 입구부분에서의 난류량의 거동은 디퓨저의 하류의 유동에 많은 영향을 미치므로 엄밀한 실험결과와의 비교검토가 필요하다. 이 연구에서는 우선적으로 안내댐퍼의 편각변화에 따른 내부유동의 변화를 고찰하기 위하여 동일한 형상에 대해 소형회류수조를 이용하여 PIV계측을 하였다. 입구조건은 디퓨저의 상류 200mm에서 정류기를 통하여 균일하게 유입되도록 하였다. 입구유속은 0.35m/sec이며 이때의 레이놀즈수는 $Re=10^4$ 이다.

유동장의 좌표축과 개략도는 그림1과 같으며 그림7은 실험장치의 구성도이다. 실험에서 주유동의 방향을 x , 디퓨저의 길이방향을 z , 주유동의 수직 방향이 y 축이며 계측 영역은 원점을 기준 하여 $x/W_1=1.0\sim 5.6$ 이다. 가시화를 위한 유동장 조명은 5W 출력의 Argon-Ion 레이저와 실린드리컬렌즈가 연결된 광파이버를 이용하고 고속카메라로 촬영하였으며 PIV 시스템은 CACTUS'2000이다. 유동장의 가시화는 비중 1.02 전후의 PVC 입자(직경 $90\sim 150\mu m$)를 유동장 내에 주입하고 2차원 단면 광을 유동장의 상부에 조사하여 산란된 입자영상을 고속카메라로 획득하는 방법을 사용하였다. 고속카메라는 640×480 픽셀 해상도에 픽셀당 8비트의 그레이 레벨을 가지며 부분해상도에서는 초당 600장의 속도로 연속촬영이 가능하다. 상관영역은 35×35 픽셀이며 탐색반경은 8픽셀이다. 에러 처리는 모든 격자에 대하여 발산값을 계산하여 허용치를 초과했을 경우에 오류백터로 판별하였다. 표1에 실험조건을 요약하였다. 여기서 오류백터의 비율은 최종적으로 선별된 개수에 대한 백분율이다.

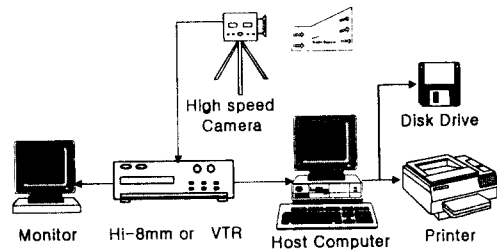


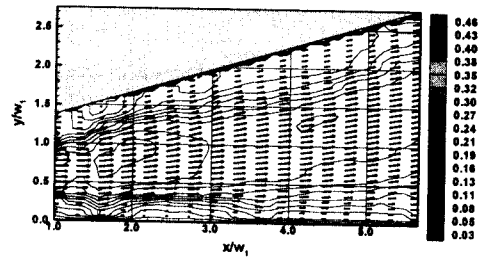
Fig. 7 Schematic arrangement of PIV system

Table 1 Experimental Condition

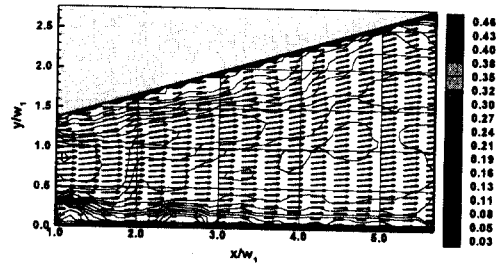
	Specification
Image board	DT3155 (640 x 480 Pixel, B/W)
Light source	5W Argon-Ion Laser, $\lambda=514\mu\text{m}$
Sheet light	Cylindrical Lens, about 1.5mm
Gap ratio(H/D)	H/D=2.0, H/D=2.2, H/D=2.4
Reynolds Number	3.0×10^3 , 5.0×10^3
Particle	PVC(Specific Gravity:1.02)
Resolution	1/400 sec
Calculation Time	20 second/Frame(200MHz)
Image Record	Hi-8mm, Sony, Model:Pro5000
Identification	CACTUS'2000, IIT. Co.
Error Vector(%)	Under 0.5 %/Frame

3.2 실험결과 및 고찰

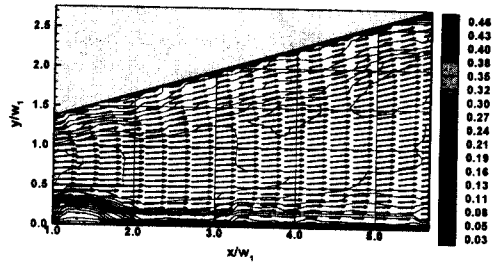
그림8은 안내댐퍼의 하반부($x/W_1=1.0$)로 부터 $x/W_1=5.6$ 까지 영역에서 계측된 전 유동장의 순간속도분포이다. 측방향으로 3개의 벡터를 건너 띄어 나타내었으며 동일속도에 대하여 등고선으로 표시하였다. 전체적으로 벽면에서 낮은 속도분포를 보이고 있으며 안내댐퍼에 근접한 영역에서 두 개의 흐름영역으로 분리되는 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림8(d)의 경우 $x/W_1=4.0$ 이상에서까지 이러한 속도분포를 보이고 있다. 그림 8(a)은 안내댐퍼가 없는 경우의 순간속도분포이다. 주유동방향이 하부면으로 치우쳐 있으며 상부면이 근접한 영역에서의 속도분포는 매우 작게 나타나고 있다. 그림3(b)의 경우는 안내댐퍼의 편각이 $\phi=7^\circ$ 인 경우이다. 안내댐퍼가 없는 경우에 비하여 속도분포는 균일하나 디퓨저의 중심선상($y/W_1:0.7\sim 1.3$ 단면)을 기준 하여 비대칭적인 속도분포를 보이고 있다. 이러한 점은 안내댐퍼의 편각이 $\phi=14^\circ$ 인 경우에 크게 나타나고 있다. 또한 그림 8(d)에서는 하부면에 근접하여 박리된 흐름이 발생하고 있으며 하류로 진행하고 있다. 그림 8(c)의 경우는 네가지 실험조건 중 가장 우수한 흐름특성을 보이고 있다. 수치해석의 결과와 도 같이 환기용 디퓨저로서 사용 가능 할 것으로 판단된다. 그림9는 디퓨저의 중심선상의 속도와 $x/W_1=4.0$ 선상에서의 PIV계측에 의한 속도를 나타내었다. 안내댐퍼의 편각 $\phi=14^\circ$ 의 경우 상하부의 비대칭성이 크게 나타나고 있고 중심선상의 속도도 큰 폭으로 변하고 있다.



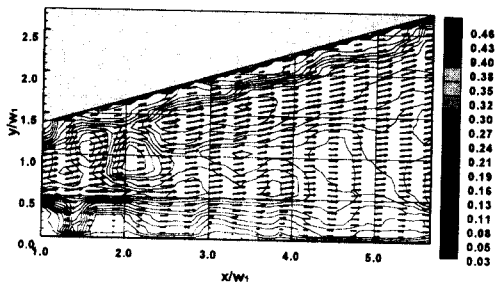
(a) Without guide damper



(b) Angle of guide damper : $\phi=7^\circ$

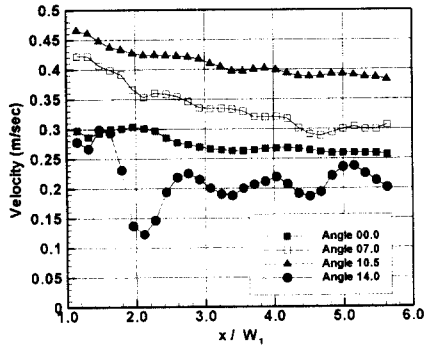


(c) Angle of guide damper : $\phi=10.5^\circ$

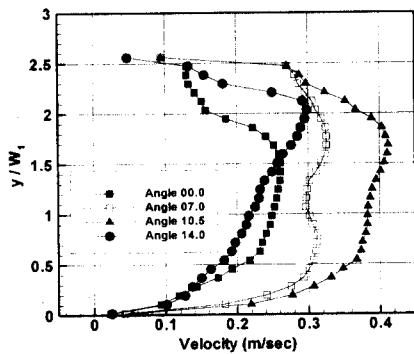


(d) Angle of guide damper : $\phi=14^\circ$

Fig. 8 Velocity Profile distribution (Re= 3.0×10^3 , open angle $2\theta=40^\circ$)



(a) Center line



(b) Line velocity profile at $x/W_1=0.4$
Fig. 9 Velocity profiles by PIV

이것은 디퓨저 내부에서 안내댐퍼에 의해 유동 영역이 분리되고 안내댐퍼의 하부에서 박리된 와류가 디퓨저의 내부 유동특성에 크게 영향을 주기 때문이다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 안내댐퍼의 길이와 설치의 각도가 충분히 고려되어야 한다. 물을 작동유체로 하는 PIV계측 결과는 수치계산의 결과와 직접 비교할 수는 없으나 안내댐퍼의 편각에 따른 내부의 흐름특성은 유사함을 보였다. 그리고 그림 9에서 나타난 바와 같이 안내댐퍼의 편각은 10.5°의 경우가 가장 우수한 결과를 보였다.

4. 결론

이 연구에서는 사각덕트 방식의 환기용 디퓨저를 설계하기 위한 기초자료로서 확산각 2θ

=40°, 면적비 3.7인 광각디퓨저에 대하여 Launder와 Sharma 난류모델로 채택하고 Hybrid scheme을 이용하여 수치해석을 하였으며 PIV에 의해 안내댐퍼가 없는 경우 및 댐퍼의 편각의 변화에 따른 속도분포를 계측하였다. 그 결과 실속으로 인해 디퓨저 성능이 극도로 저하되는 확산각을 갖는 디퓨저에 안내댐퍼를 설치하여 성능이 향상되어 환기용으로 사용할 수 있음을 보였다. 안내댐퍼의 편각에 따른 광각디퓨저의 성능은 $\phi=10.5^\circ$ 일 때 속도 및 압력분포에서 가장 우수한 결과를 얻었다.

참고문헌

- [1] M.I.Oslpov and A.N.Arbekov, "Investigation of Turbulent Structure and Stability of Flow in Conical wide-angle Diffusers with Tangential Swirling Injection", proc. EHTFMT, pp.1431-1435, 1997
- [2] H.M.Jeong and H.S. Chung, "선회류 유입에 대한 원추디퓨저의 정압회복 특성," 대한기계학회논문집B, Vol.22, No.7, pp.503-508, 1998
- [3] M.S.Kim, H.B.Kim and D.H.Lee, "Installation of a wedge-Type Screen in a Wide Angle Diffuser", 한국항공우주공학회, Vol.10, No.2, pp.1-11, 1982
- [4] C.S.Lee, J.S.Jung, K.H.Hong AND S.Y.Jeong "An Experimental on the Flow Characteristics of a Swirl-Jet Diffuser " 대한기계학회논문집B, Vol.6, No.2, pp.103-109, 1994
- [5] J. P. Johnston, "Review: Diffuser Design and Performance Analysis by a unified Integral Method", j. Fluids Eng. Vol.120, pp. 6-18, 1998
- [6] R.E.Child and J.H.Feriger, "A Computational Method for Subsonic Compressible Flow in Diffuser," Paper#83-0505, AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting, 1983
- [7] 김형수, 정태선, 유홍선, 최영기, "역압력구배가 있는 난류유동에 대한 수치적 연구," 대한기계학회논문집, Vol 15, No.2, pp.668-676, 1991
- [8] A.S.Joseph and E.F.Allen, "Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery," John Wiley & Sons, Inc, pp.2024-2044, 1996