

Ejector 내의 유동특성에 관한 연구

이행남* · 박지만** · 이덕구**

*조선대학교 기계공학과

**조선대학교 기계공학과 대학원

A Study on the Velocity Distributions and Pressure Distributions in Ejector

Haeng-Nam Lee*, Ji-Man Park** Duck-Gu Lee**

*Chosun University Mechanical Engineering

**Chosun University Mechanical Engineering Graduate School

KEY WORDS: PIV(입자영상유속계), CFD(전산유체역학), Ejector(이젝터), $k-\epsilon$ model($k-\epsilon$ 모델), Mean Velocity Vector (평균속도분포), Pressure Distributions(압력분포)

ABSTRACT: The Ejector is used to get low pressure, and it has been applied to a lot of industry field like the heat engine, the fluid instrument power plant, the food industry, environment industry etc... because there are not any problem even it is mixed with a any kind of liquid, gas, and solid. The flow characteristics in ejector are investigated by PIV and CFD. The experiment using PIV measurement for mixing pipe's flow characteristics acquired velocity distribution, Condition : when mixing pipe's diameter ratio is 1:1.9, and the flux is $Q_1 = 1.136 \text{ l/s}$, $Q_2 = 1.706 \text{ l/s}$, $Q_3 = 2.276 \text{ l/s}$. Based on the PIV and the CFD results, the flow characteristics in ejector are discussed, and it shows the validity of this study.

1. 서 론

일반적으로 유체의 이동은 중력에 의한 위치에너지를 이용하는 방법과 펌프와 같은 동력에너지를 이용하는 방법이 있다. 이젝터는 분사유체의 운동에너지를 이용하여 저압을 얻는 장치로 기계적 운동부분이 거의 없기 때문에 고장이 잘 일어나지 않는다. 또한 생산현장의 열기관이나 유체기계발전소의 대류열전달 및 공기조화 덕트시스템 등에는 필연적으로 관로망이 연결되며 이들 관로망의 설계는 플랜트 전체의 효율뿐만 아니라 안정성과도 밀접한 관계를 갖고 있다.⁽¹⁾

Fluegel⁽²⁾은 액체-액체 이젝터의 기본방향을 베르누이 방정식과 운동량 방정식을 적용하여 기본적인 해석방법을 제시하였으며 증기-증기 이젝터의 각각의 상태점을 엔탈피-엔트로피 선도로 나타내었다. Sun and Eames⁽³⁾는 증기-증기 이젝터의 이론연구와 응용분야를 확립하였다. Witte⁽⁴⁾는 액체-가스 이젝터에 대한 이론적인 설계방법을 제시하였고, Biswas and Mitra⁽⁵⁾는 다공노즐에 흡입량과 액체와 가스의 혼합 특성을 규명하였다.

그러나 이러한 장치들에 대한 연구는 압력측정이나 온도, 유량 측정 등 이론적 연구만으로 이젝터(Ejector)의 효율을 연구하여 원리적 및 복잡한 유동양상 거동에 대한 정확한 해석에는 많은 단점을 가지고 있다.

하지만 최근에는 컴퓨터나 계측장치가 발전함에 따라 보다 정확한 유동양상의 거동을 파악하는 것이 훨씬 수월하게 되었다. 이와 관련된 예로서, 유동에 분포된 가시화 입자가 짧은 시간동안 미소 변위를 영상처리에 의해서 자동 추적함으로써 속도 벡터를 전 유동 영역에 걸쳐 구할 수 있는 새로운 계측방법으로 PIV(Particle Image Velocimetry)가 개발되어서 많은 적용예를 보이고 있다.⁽⁶⁾ 또한 최근들어 컴퓨터의 용량 및 수치해법의 급속한 발달에 힘입어 CFD(Computational Fluid Dynamics)기법이 근래에 빠른 속도 성장하여 유체역학적인 문제를 활발히 해석하여 실험값과 비교, 분석이 가능할 뿐 아니라, 실험으로 얻기 어려운 많은 유용한 정보를 얻고 있으며 이러한 결과들을 바탕으로 최적화 설계 효율을 높이고 있는 추세이다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 이젝터(Ejector)가 설치된 구동관로와 확대관로의 흡인에 의한 유동특성을 분석하고, 구동관로의 유량을 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화를 통해서 순간 속도벡터 등 확대관로의 유동특성을 실험연구 하고자 한다. 또한 PIV 계측실험을 통해서 얻어진 자료를 바탕으로 CFD 상용코드인 STAR - CD를 사용하여 PIV 계측 실험에서 얻지 못한 압력분포 값을 해석하여 주어진 조건에서의 이젝터가 부착된 확대관로의 속도분포 및 압력분포를 규명하고자 한다.

제1저자 이행남 연락처: 광주광역시 동구 서석동 조선대학교
062-230-7131 hnlee@mail.chosun.ac.kr

2. PIV 계측 및 CFD 분석

2.1 실험장치

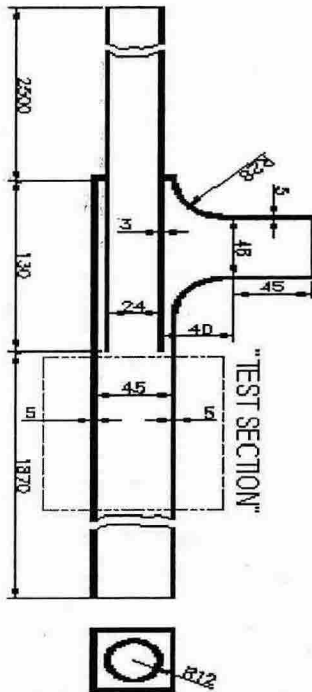


Fig. 1 Experiment apparatus and Test section type here

Fig. 1 은 본 연구를 위해 사용된 흡입관로가 부착된 이젝터를 도시하였다. 본 실험에서는 구동관로의 유량 및 레이놀즈 수를 변화시키면서 PIV를 이용해 얻어진 영상정보를 분석하여 평균속도벡터 분포, 평균운동에너지, 평균와도 등 이젝터를 통해 유입된 확대관로의 유동특성을 고찰하고자 한다. 본 실험에 사용된 이젝터가 부착된 확대관로는 유동가시화를 위해 두께 5mm, 내부 원형관은 3mm인 투명아크릴로 제작하였으며 확대관로의 내부 단면적은 45mm×45mm, 수력직경은 45mm, 입구 쪽에서 이젝터 끝단까지의 거리는 2.63m로 설치하였으며, 출구 쪽 길이는 1.87m로 제작하였다. 또한 충분히 발달된 유동을 만들기 위한 입구 길이는 2.5m이다. 가시화를 위하여 사용된 장치로는 Argon-ion laser(최대 7W), CCD 카메라(640×480pixel), 220V 정전압 트랜스를 이용한 송풍기, 초음파형 입자발생기, Optical Fiber Cable, LLS Probe(Laser Light Sheet), 가시화 화상 분석을 위한 DT Board를 장착한 Host-Computer 및 분석 프로그램은 Cactus 2000을 사용하였다.

2.2 PIV 계측

입구로 유입되는 작동 유체는 상온(20 °C ±1)의 공기이며, 추적입자는 유동장에 영향을 끼치지 않으면서 충분한 입자를 생성시키기 위해 초음파 입자발생기를 이용하여

입자를 생성시켰다. 유동해석을 위해 실제로 측정된 실험 장치의 Test Section은 구동관로가 흡입관이 부착된 확대관로와 만나는 지점을 기준으로 길이방향은 100mm, 높이는 45mm인 Mixing Area 100 × 45 mm를 잡았으며, 영상정보를 획득하기 위하여 LLS Probe를 사용하여 2차원 Sheet light를 형성하여 입자를 가시화 시켰으며, 그 위치는 유동패턴을 가장 잘 확인할 수 있는 중간지점으로서 폭 25mm 지점에 조명을 비추었다. 촬영된 영상은 CCD카메라의 홀수필드와 짝수필드에 각각 입력된다. 구동관로의 입구쪽에서 220V 정전압 트랜스를 이용하여 송풍기의 일정한 회전수를 유지시켜 Re 수 변화를 $Q_1 = 1.136 \text{ l/S}$ 일 때, $Re = 3989$, $Q_2 = 1.706 \text{ l/S}$ 일 때, $Re = 5992$, $Q_3 = 2.276 \text{ l/S}$ 일 때, $Re = 7995$ 로 변화시키면서, 가시화 입자인 초음파형 입자발생기내의 입자를 송풍기 팬을 통해서 주입시켰으며, 충분히 발달된 유동이 형성되어지면 Argon-ion 레이저(LEXEL, 최대 7W)를 조사시킨 후 구동관로와 확대관로가 만나는 Mixing Area 부분의 유동장을 CCD 카메라(XC-77RR)로 촬영하였다. 이렇게 얻어진 영상정보를 이미지 보드 DT-3152 Board(Data Translation사, 640×480, 흑백)를 장착한 Host Computer에 연결하여 CACTUS'2000을 통해 확대관로의 유동특성을 해석하였다. 이 때 계측영역의 순간속도분포를 얻는데 Host-Computer의 처리시간은 약 20초 전후였다.

본 실험은 유량 변화 값의 차이가 그다지 크지 않고, 유속 또한 빠른 고속이 아니므로 CCD 카메라를 사용하여 유동을 촬영하였으며, Field Selection에서 1st Frame의 Odd와 Even을 선택하여 입자의 최대 이동거리를 나타내었으며, 속도벡터를 검출해 내기 위해 사용된 알고리즘은 제조치상호상관법이다.

2.3 CFD 분석

본 연구에서는 PIV 계측 실험을 바탕으로 실제적인 실험과 동일한 조건으로 상용 CFD코드인 STAR - CD를 이용하여 구동관로와 확대관로의 직경비 1 : 1.9에 따른 전압력분포, 정압력분포를 분석하였다. 구동관로의 유속을 고려하여 정상 상태, 비압축성 유동으로 가정하였으며, 사용된 알고리즘은 SIMPLE를 사용하였고, 난류 모델은 $k - \epsilon$ 모델을 적용하였다. Ejector의 모델링에 대한 구동관로의 유동형태를 보다 더 자세히 구현하고자 원형관로는 Ogrid-mesh를 사용하였으며, Mixing Area부분과 흡입관로의 rounding 처리한 부분은 메시를 더 강화하여 총 격자의 수는 202538개로 나타내었다. 입구 쪽의 속도는 실험조건과 동일하게 $Q_1 = 1.136 \text{ l/S}$, $Q_2 = 1.706 \text{ l/S}$,

$Q_3 = 2.276 \text{ l/S}$ 로 속도변화를 주면서 분석하였으며, 각각의 Solver Iteration값은 각각 311, 316, 323 값에서 수렴하였다.

3. 결과 및 고찰

구동관로에 대한 확대관로의 비는 1 : 1.9로서 이젝터를 통과한 후 확대관로를 지나는 유동에 관해 확산효과를 고려하여 설계하였다. 입구 쪽 유량을 각각, $Q_1 = 1.136 \text{ l/S}$, $Q_2 = 1.706 \text{ l/S}$, $Q_3 = 2.276 \text{ l/S}$ 로 변화시켜, 발생하는 평균속도 벡터장, 평균에너지 분포, 압력분포 등을 분석프로그램인 CACTUS2000, STAR-CD를 사용하여 PIV와 CFD를 비교, 분석하였다. 이 때, 입구 쪽 유량값에 대한 Re수는 각각 $Re_1 = 3989$, $Re_2 = 5992$, $Re_3 = 7995$ 이다.

Fig. 3에서는 PIV에 의해 분석된 유동장의 속도벡터 분포를 나타내고 있으며, 해석된 영역은 구동관로가 확대관로로 나오는 지점으로부터 길이 100mm인 지점까지의 영역을 분석한 것이다. Re수가 3989일 때 속도분포는 구동관로에 흡인되어지는것에 영향을 크게 주지는 않지만 Re수가 5992, 7995로 증가할수록 흡인되는 속도 또한 커지며 Re수가 5992일 때, x축 방향의 35mm부근 에서 이차유동이 발생함을 알 수 있으며, 또한 $Re=7995$ 일 때, $x = 15\text{mm}$ 부근 지점에서부터 이차유동이 발생되어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 속도가 증가할수록 흡인되는 속도는 증가하며, 흡인속도의 영향으로 인한 확대관로 내에서 이차유동이 발생되며 그 영향은 더 커짐을 알 수 있다. Fig. 4는 동일 조건하에서 얻어낸 CFD 분석값을 나타내고 있다. PIV를 통한 실험은 실제적인 형태에서 발생되어지는 여러 가지 손실에 의해 입구 쪽의 레이놀즈 수와 유량의 변화에 따라 속도벡터형태가 변화하고 있지만, CFD 분석값에서는 점성만을 고려하고, 아크릴 표면의 조도에 의한 영향등 기타손실은 무시하였으며, 실제 유체가 아닌 이상유체로 간주하였기 때문에 벡터장의 형태가 규칙적인 변화를 보이고 이로 인해 PIV 실험값과는 다소의 차이가 나타남을 알 수 있다. CFD 분석에서 rounding 처리된 흡입관 부분에서 재부착점이 형성되어 유동 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있는데, 곡물이 와류 생성에 미치는 영향에 관한 연구도 필요하다고 사료된다.

Fig.5는 실험값과 수치해석값의 차이를 확인하기위해 구동관로에서 빠져나온 지점에서부터 확대관로의 거리 $L=70\text{mm}$ 인 지점에 대한 각 높이의 평균속도분포를 비교 분석 하였으며, 이 부분을 설정한 이유는 정상상태로 가정하여 수치해석을 행하였기 때문에 유동패턴이 비교적 안정성을 갖는 구간과 비교되어야 하기 때문이다. 확대관

로의 높이에 대한 각 지점의 비($\frac{y}{D_h}$)가 벽면에 가까워지는 0.3 ~ 0.1, 0.75 ~ 0.9 구간에서 두 값에 대한 많은 오차가 발생하는데, 이에 대한 원인으로서는 벽면에 대한 점성력의 영향과 정상상태로의 가정 등의 이유 때문이며 또한, 구동관로에 유출되는 최대유속지점들에 대한 PIV 값과 CFD의 속도값과 비교해 볼 때, 실험값이 수치해석 값보다

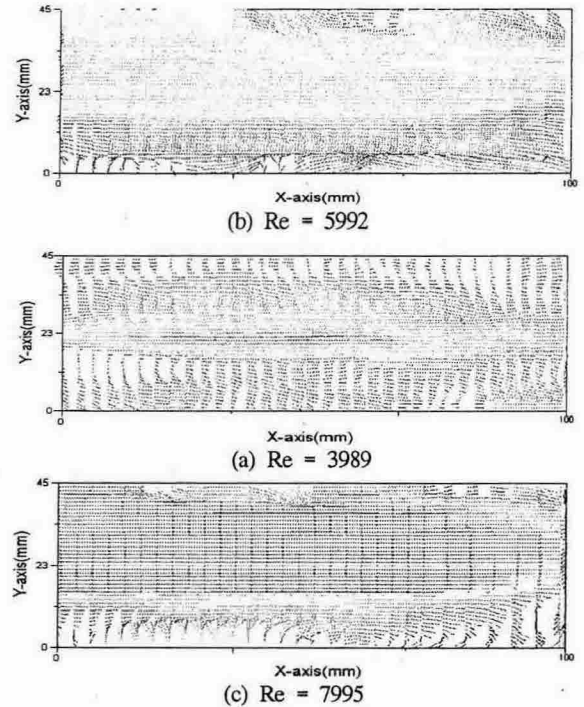


Fig. 3 Mean Velocity Vector Field by PIV

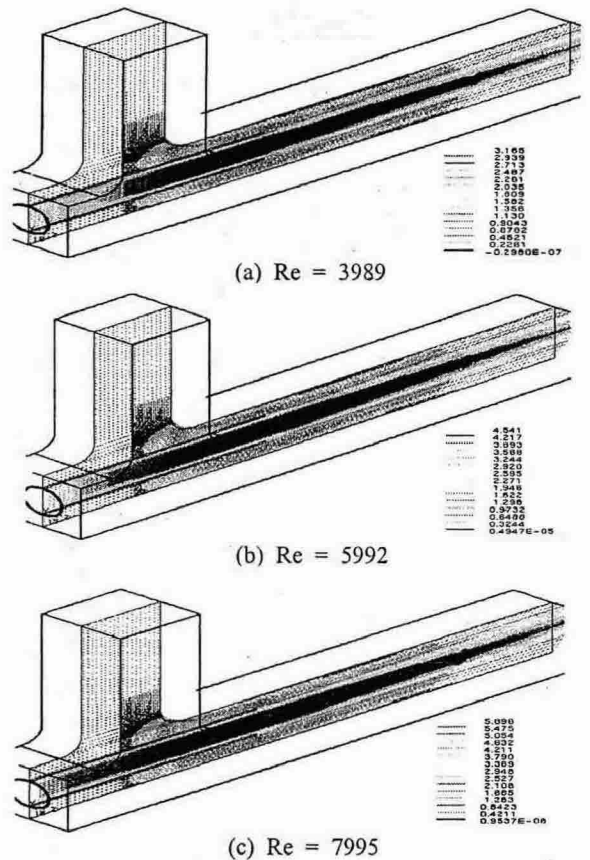


Fig. 4 Mean Velocity Vector Field by CFD

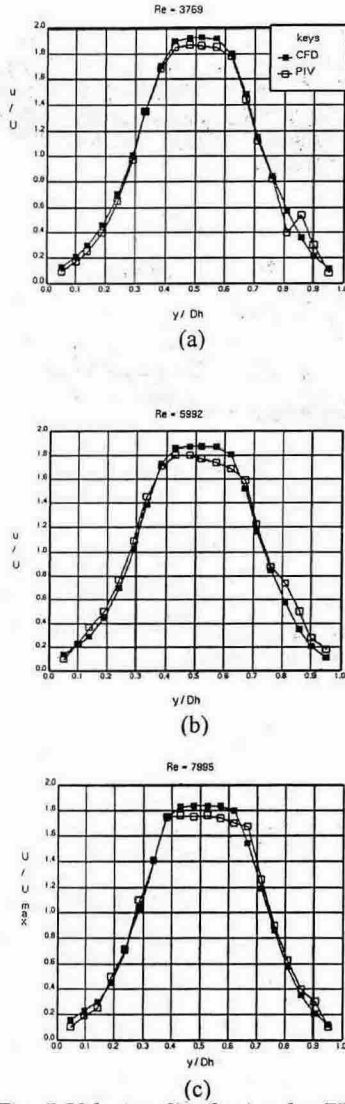


Fig. 5 Velocity distribution by PIV and CFD

더 작은 값을 갖는 것도 이러한 이유 때문이라 생각된다. $L = 70\text{mm}$ 인 지점에서 얻어진 PIV, CFD의 평균속도 값에 관한 일치도는 평균 93%로서, 이 결과는 실험결과와 수치해석 결과가 어느 정도 일치함을 나타내고 있다.

Fig 6는 CFD로 분석한 시험관로내의 Re 수의 변화에 따른 정압력 분포를 보여주고 있다. PIV에서는 단일 평면내의 유동에 관한 정보를 제공해주기 때문에 그 부분에 대한 압력 값을 얻어낼 수 없지만 CFD에서는 유한체적법을 이용한 3차원적인 수치해석 값을 얻어냄으로 압력 값을 얻어낼 수 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 최대 압력값과 진공압력값에 대한 차이는 커지고 이로 인해 흡인되는 압력차이도 커진다는 것을 알 수 있으며, 크기가 커지면서 속도분리점이 확대관로로 흡인 될때 rounding 처리된 부분에서 와류 부착점이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

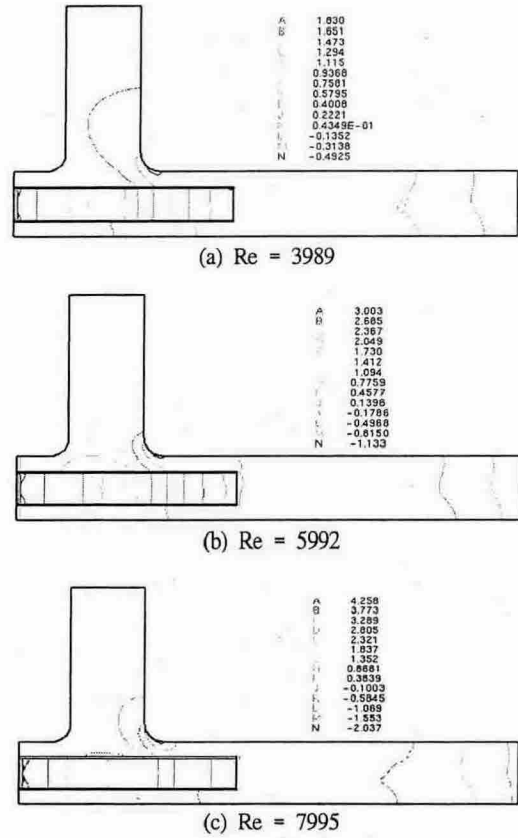


Fig 6. Static Pressure Distributions by CFD

Fig. 7에서는 CFD를 통해 분석한 전압력 분포를 혼합관로의 전체높이에 대한 각 지점의 높이의 비로 나타내고 있다. 유동이 진행함에 따라 압력분포가 어떠한 형태로 변화되어가야 할지 알아보기 위해 구동관로가 확대관로와 만나는 지점($L=0\text{mm}$)을 기준으로 $L_1=25\text{mm}$, $L_2 =50\text{mm}$, $L_3 =75\text{mm}$, $L_4 =100\text{mm}$ 인 부분의 전압력분포를 나타냈다.

(a)에서 거리 L 에 대한 평균전압력은 각각 $P_{T1} = 2.1148$, $P_{T2} = 2.0506$, $P_{T3} = 1.9687$, $P_{T4} = 1.8846$ [Pa]이고, (b)에서는 각각 $P_{T5} = 4.6046$, $P_{T6} = 4.4830$, $P_{T7} = 4.3250$, $P_{T8} = 4.1650$ [Pa]이며, (c)에서는 각각 $P_{T9} = 8.0068$, $P_{T10} = 7.8182$, $P_{T11} = 7.5785$, $P_{T12} = 7.3352$ [Pa]이다. 0.2, 0.8을 기준으로 벽근처에서 (a), (b), (c) 모두 음압이 발생되는 것을 알 수 있으며, 레이놀즈수가 증가 할수록 벽근처의 음압의 크기차이도 커지는 것을 확인할 때, 벽면전단력의 영향을 받아 벽 근처에 걸쳐 와류가 형성된다는 것을 예상할 수 있다. 최고압력에 해당하는 지점은 (a), (b), (c) 모두 $\frac{y}{D_h}$ 의 0.4 ~ 0.6 범위이고, 이 범위는 주어진 조건의 레이놀즈수에 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있으며, 값의 크기는 차이가 있지만, 구동관로가 직관이기 때문에 확산효과

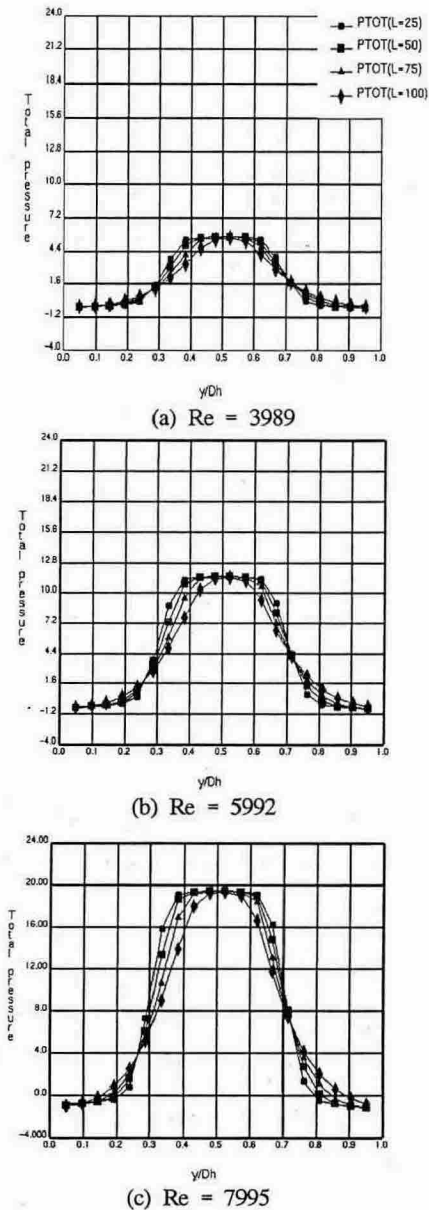


Fig. 7 Total Pressure Distribution

(diffuser)은 일어나지 않는 것으로 나타났으며, 압력차가 가장 크게 변화하는 구간으로는 0.3 ~ 0.4, 0.6 ~ 0.7인 지점으로서, 레이놀즈 수가 커질수록 전압력은 크게 증가하고, 거리 L을 통과할수록 전압력은 벽면전단의 영향과 흡인에 의해 감소된다는 것을 알 수 있다. 또한, (a), (b), (c) 모두 0.3, 0.7을 기준으로 전압력 값이 일정한 선형성을 유지한다는 한 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 8은 각각의 입구조건에 대한 평균운동에너지를 보여주고 있으며, 구동관로에서 유출되는 유량의 변화 값이 커질수록 전체적인 평균운동에너지 값 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 각각의 조건에서 주목할 만한 차이점은(a)에서는 구동관로에서 확대관로로 유출될 때, 운동에너지 값이 곡선 형태를 보이면서 그 값이 50mm부근까지는 증가하다가

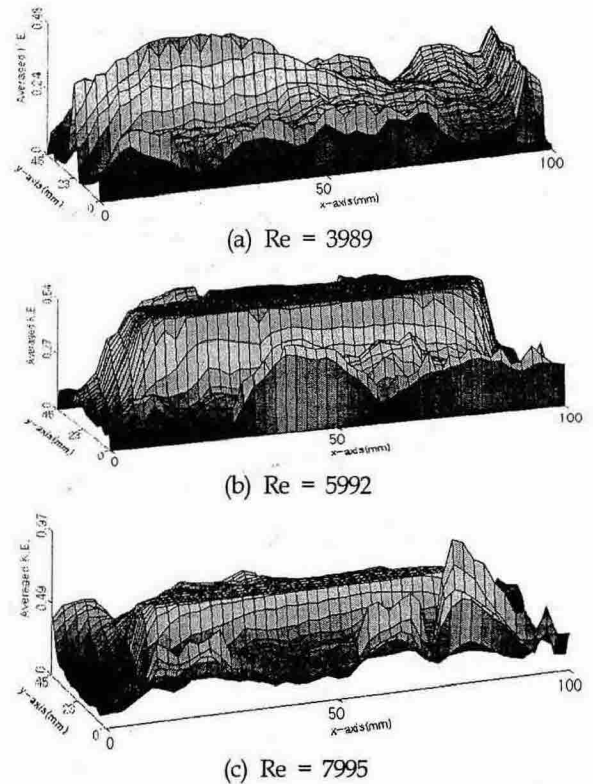


Fig. 8 Mean Kinematic Energy

하다가 그 이후에는 감소되어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 (b), (c)에서는 확대관로로 유출될 때, 각각에 대한 운동에너지는 일정한 크기를 유지하면서 계측영역구간까지 그 값이 큰 변화없이 일정하다는 것을 확인할 때, (a)

$Re_1 = 3989$ 은 난류값의 레이놀즈수이지만, 그 값이 저 난류 값에 해당하고, 유동에 별다른 효과를 주지 못한다고 볼 수 있다. 즉, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 운동에너지 값은 증가하지만 흡인효과를 증가시키기 위해서는 적정 이상의 레이놀즈 수로 증가시켜주어야 한다고 사료되며, 추후 흡인효과를 증가시키는 적절한 조건을 만족시키는 레이놀즈 값을 찾아내는 연구도 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 분지관로가 부착된 Ejector 내의 흡인현상을 규명하기 위해 PIV 실험기법과 CFD 수치해석 분석을 사용하였고, 주관부의 유량 및 Re수의 변화에 따른 확대관로의 속도분포 및 압력 분포를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

[1] PIV 실험 계측에 의한 평균속도분포는 평균 93% 일치하였다.

[2] 주어진 조건에서 레이놀즈수를 증가 시키면 분지관에서 흡인되는 속도는 증가되며, 구동관로에서 확대관로로 유출될 때 임계 값이 존재한다.

[3] $\frac{v}{D_h}$ 값 0.4 ~ 0.6 범위는 레이놀즈가 변화해도 전압력 분포는 선형적으로 일정하게 변화하고, 최고압력의 크기는 레이놀즈수가 클수록 증가한다.

참 고 문 헌

- 1) Ph.D Thesis. Chosun. Univ.: Koh. Y. H, "A Study on Turbulent Characteristics of Developing Turbulent Steady and Unsteady Flows in the Entrance Region of a Square Duct", 1992
- 2) Fluegel, G., March/April, Berechnung von strahlapparaten, VDI Forschungsheft 395 Ausgabe B Band 10
- 3) Sun, D.W, and Eames, I.E., Recent developments in the design theories and applications of Ejectors-a review, Journal of the Institute of Energy, Vol. 68, June, pp. 665~676, 1995.
- 4) Witte, J.H., Efficiency and design of liquid-gas ejector, British-chemical Engineering, Vol. 10, No. 9 pp. 602~607, 1965
- 5) Biswas, M.N, and Mitra, A.K., Momentum Transfer in Horizontal Engineering multi-jet liquid-gas ejector, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 59, pp. 634~637, 1989.
- 6) Lee, H.-N., Park, G.-M., Lee, D.-G., The Flow Characteristics in Dividing Ducts, Journal of Fluid Machinery, Vol 5-4, pp. 19~25, 2002.
- 7) Park, B. C., Cho, Young I., and Choi, Stephen, "Separation and Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe", J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, 37, pp. 174~199, 1990,
- 8) Lee, S. J., Kim, K. C., Dho, D, H. "PIV VELOCITY FIELD MEASUREMENT TECHNIQUES AND APPLICATIONS" VOL 1, 2001.