

분지덕트 내의 유동특성

이행남* · 박길문* · 이덕구**

The Flow Characteristics in Dividing Ducts

Haeng-Nam Lee*, Gil-Moon Park*, Duck-Gu Lee**

Key Words: PIV (입자영상유속계), CFD (전산유체역학), Dividing Duct (분지덕트), Mean Velocity Vector (평균속도벡터), Mean Kinetic Energy (평균운동에너지), Total Pressure Distributions (전 압력분포)

ABSTRACT

The flow characteristics in a bifurcated duct are investigated experimentally. Physical properties such as mean velocity vectors, mean vorticity, and total pressure distributions are obtained for three different Reynolds numbers (578, 620, 688) using PIV measurements and CFD analysis. Also, two different dividing ducts (90°, 60°) were selected for study. The results of this study would be useful to the engineers designing flow systems for heating, ventilation, air conditioning and waste-water purification plants.

1. 서론

사각 분지 유동은 복합 관로계에서 열, 통풍, 공기조화 등과 결합되어지는 장치와 폐수처리장치 및 수로계 유동에 응용되어지고 있다.

기존 연구들은 공기나, 물 등과 같은 유체로 실험을 했고, 분지관내에서 정상, 비정상 층류 유동에 관하여는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 분지부 유동에 관한 연구는 대부분 난류 유동에 관한 산업적 응용을 바탕으로 연구가 진행되어 왔다^(1~3).

최근 PIV는 정밀한 가시광 레이저와 광학 장치 사용으로 전체 유동장의 순간 속도분포, 난류강도, 운동에너지 및 와류 등을 잘 재현할 수 있으며, PIV는 입

력장치를 통한 실험부의 연속적인 해석이 언제라도 가능하여 보다 정확한 분지부 유동특성을 규명할 수 있다⁽⁴⁾.

또한 1980년대 후반부터 전자계산기의 대용량화 및 고속화에 따라 수치해석에 관한 연구가 활발하게 이루어졌고 주로 전산유체역학 연구와 실험적 연구가 함께 이루어졌다.

본 연구는 분지덕트에 각도에 따른 직관덕트에서 층류정상유동의 유동변수들이 유동특성에 미치는 영향을 고찰하고 객관적인 정확성을 얻어 덕트설계에 유체공학적인 기초자료를 제공함에 본 연구의 목적이 있다. 사각 분지덕트의 주관과 지관의 유속을 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화를 통해서 평균 속도벡터, 평균운동에너지와 CFD를 이용한 분지부내 주관의벽 근처와 지관의 내·외벽 (벽에서 5mm떨어진 부분) 속도변화 및 전 압력 분포의 분지부내 시험부의 유동특성을 규명하고자 한다.

* 조선대학교 기계공학부

** 조선대학교 대학원 기계공학과

E-mail : potentialflow@empal.com

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구를 위한 개발된 분지 사각덕트와 시험부를 도시하였다.

본 실험에 사용한 개발된 분지 사각 덕트는 두께가 7.5mm인 가시화를 위해서 투명아크릴로 제작했으며, 내부 단면적이 50mm×50mm, 수력직경은 50mm, 입구 쪽 에서 분지부 까지의 거리를 4.2m로 잡았고, 분지부에서 출구 쪽 길이는 1.8m이다. 주관의 총 길이는 6m이며, 지관의 길이는 1.5m이다. 또한 충분히 발달된 유동을 만들기 위한 입구 길이는 4m이다.

본 실험의 가시화를 위하여 사용된 장치로는 아르곤 가시광 레이저 (최대 7W), 고속도 카메라 (최대 240pps, 흑백, 640×240픽셀), 고속도 카메라 Controls (최대160MB 저장)135장 비율로 저장했으며, 송풍팬 (최대1400rpm), Optical Fiber Cable(5m), ILS Probe (Laser Light Sheet), 가시화 화상 분석은 DT3152 Board를 사용했다.

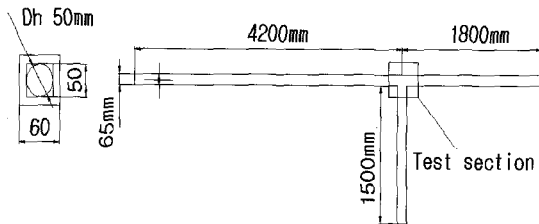


Fig.1 Schematic of tested dividing rectangular open duct.

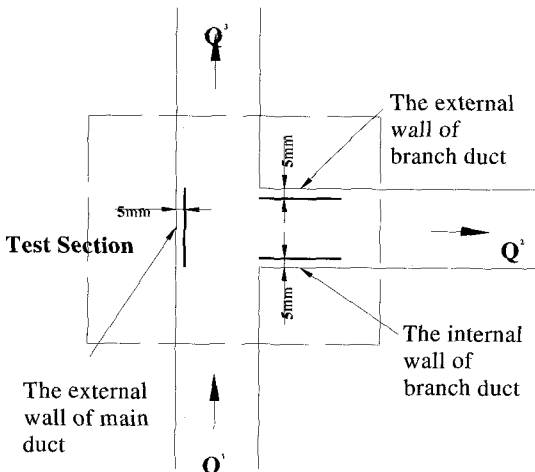


Fig. 2 Schematic diagram of test-section of the experimental apparatus.

입구로 유입되는 작동유체는 상온의 공기 ($20\text{℃} \pm 1\text{℃}$)이며, 가시화 입자로 Pine pollen (산탄입자의 크기 :10~25 μm)을 사용했다.

2.2 PIV 계측

실험하는 동안의 온도는 20℃ 이고, 온도의 변화는 $\pm 1\text{℃}$ 이하로 유지했으며, 사각 분지관 주관 입구 쪽에 송풍기를 사용하여 작동 유체를 유동하고, 송풍기의 일정한 회전수를 위해 220V 정전압 트랜스를 이용하였고, 이때 입구 쪽 유량 및 Re 수는 $Q=26.11\text{ l/min}$ 일 때 $Re_1 = 578$ 이고, $Q=28.11\text{ l/min}$, 일 때 $Re_2 = 620$ 이며, $Q=31.17\text{ l/min}$ $Re_3 = 688$ 이다.

고속도 카메라에 실제로 측정된 시험부는 주관과 지관의 분지점으로써 120mm×175mm로 설정하였다.

본 실험은 고속카메라를 사용하여 유동을 촬영했지만, 유량변화량 값들이 그다지 크지 않기 때문에 일반 CCD 카메라와 같은 분석을 위해서 Field Selection 고속도 카메라에서 135장 비율로 저장된 이미지를 Cactus2000에서 1st Frame에 홀수와 짝수영상을 선택하여 입자의 최대 이동거리와 계조치상호상관법을 적용하였다.

2.3 CFD 분석

본 연구에서는 PIV계측 실험을 바탕으로 실제적인 실험과 동일한 조건으로 90° 와 60° 의 분지관내의 속도 분포 및 압력분포를 STAR-CD 상용코드로 CFD를 분석하였다.

분지부내의 유동이 저속이므로 열전달과 압축성 효과를 무시했으며, 해석알고리즘으로 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)를 사용했다.

90° 와 60° 분지관에서의 입구 쪽의 속도는 실험과 동일하게 3개의 유량에 값에 대한 $Q=26.11\text{ l/min}$, $Q=28.11\text{ l/min}$, $Q=31.17\text{ l/min}$ 속도변화를 주면서 분석하였으며, PIV 실험에서 90° 분지부 속도분석 값과 CFD 속도 값과 비교하여 Test Section은 주관과 지관의 벽면(벽에서 5mm)에 대한 속도변화 값과 압력변화 값을 분석했다.

3. 결과 및 고찰

입구 쪽 유량 값에 대한 Re수는 각각 $Re_1 = 578$, $Re_2 = 620$, $Re_3 = 688$ 이며, 레이놀즈 수 변화에 따른 분

분지덕트 내의 유동특성

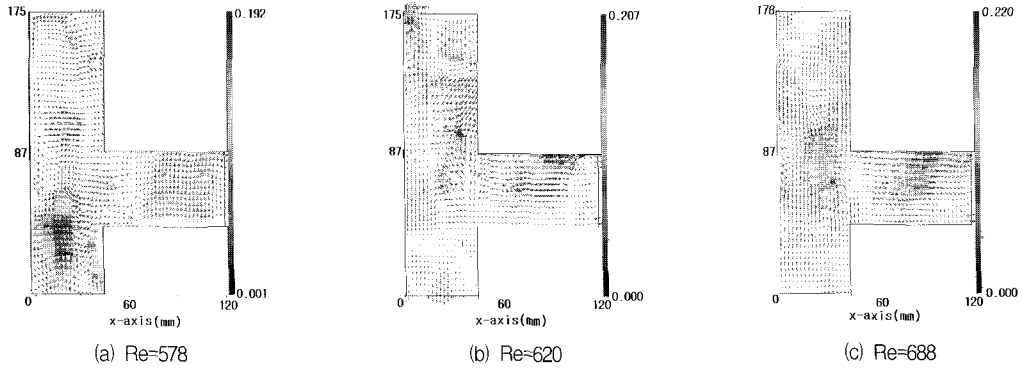


Fig. 3. Mean velocity vector fields by PIV

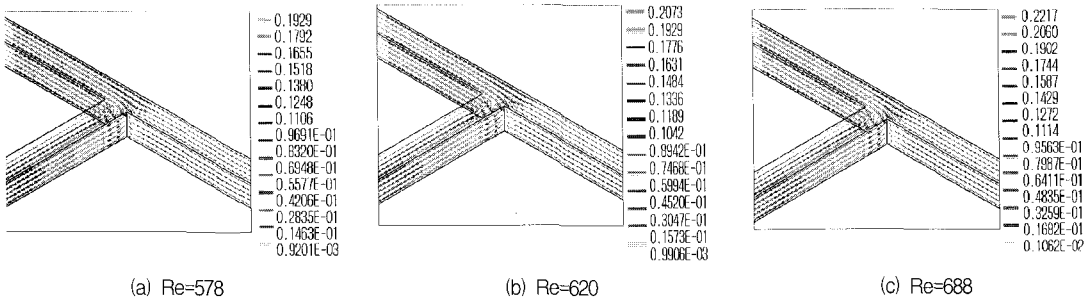


Fig. 4 Velocity fields by CFD

지관 주관출구 평균속도 U_{am} 은 0.0909m/s, 0.0956, 0.1201 m/s이고, 분지관 지관의 출구평균속도 U_{ab} 는 0.871m/s, 0.0914m/s, 0.0979m/s 이다. 압력 무차원을 위해서, Pam, Pb 각각의 수식을 $\frac{1}{2} \rho u^2$ (u : Re수에 따른 주관과 지관의 출구평균속도)로 설정하였다.

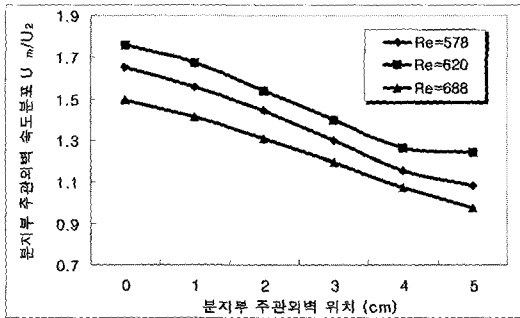
Fig. 3의 (a), (b), (c)는 입구 쪽 속도 및 레이놀즈 수 변화에 따른 평균 속도 벡터장을 보여준다. Fig. 3 (a)와 같이 평균속도 벡터장 분포도에서 나타나듯이 본 실험에서 낮은 유량 및 레이놀즈수에서는 분지부 주관과 지관에서는 저층류현상 영향으로 그다지 속도의 큰 변화가 없지만, 지관 쪽 내벽에 와류 및 재접착 (박리 종결지점)^(6,7)이 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 하지만 (b)와 (c)로 갈수록 유량과 Re수가 증가되면서 지관부의 외벽에 강한 속도 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 이것은 유량과 Re수가 증가할수록 분지부의 주관과 지관으로 들어가는 2차유동의 영향이 크기 때문에 발생된다고 사료된다.

속도는 (a)에서 0.1923m/s, (b)에서 0.2070m/s이며 (c)에서는 0.2205m/s이다. 또한 분지부 지관 쪽의 외벽에

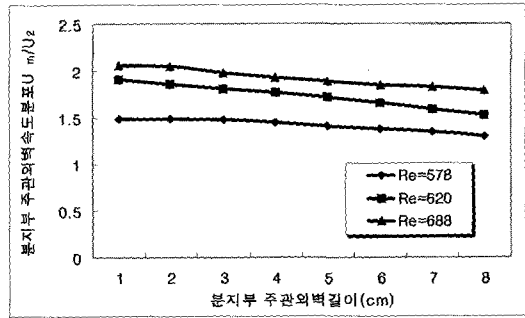
Re수가 증가할수록 와류의 재접착점 위치와 빠른 속도 벡터가 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 CFD로 처리한 90° 분지부의 속도벡터장을 보여 주고 있다. PIV를 통한 실험은 실제적인 형태에서 발생되어지는 여러 가지 손실에 의해서 입구 쪽의 레이놀즈 수와 유량의 변화에 따라 분지부의 속도벡터장의 형태가 변화되고 있지만, CFD 사용한 분석은 입구쪽 레이놀즈 수와 유량 값이 변화해도 속도 벡터장의 형태가 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. PIV를 사용하여 분석한 (a)에서 최대속도 값 0.1923m/s이고, CFD로 분석 한 최대 속도는 0.1929m/s이며, (b)의 PIV분석 값은 0.2070m/s이고, CFD분석한 최대속도 값은 0.2073m/s이며, (c)의 PIV 분석 값은 0.2205m/s이며, CFD 분석 최대속도 값은 0.2217m/s를 얻었다. 분지부의 PIV분석한 최대속도 값과 CFD로 분석한 최대 속도 값의 일치도는 평균 99.67%의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5부터 Fig. 10까지는 90°와 60° 분지관에서 유량 및 Re수가 변화 할 때 분지부 주관외벽과 지관의 내·외벽 (벽에서 5mm 근처)에서의 속도와 압력변화를 보여주고 있다.

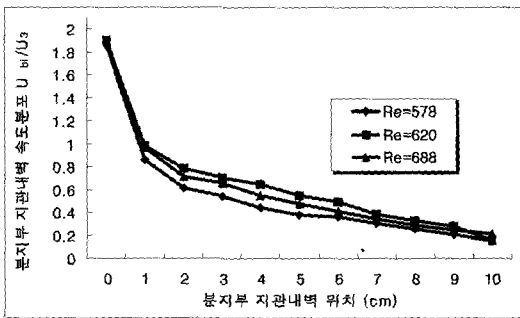


(a) 90° dividing duct

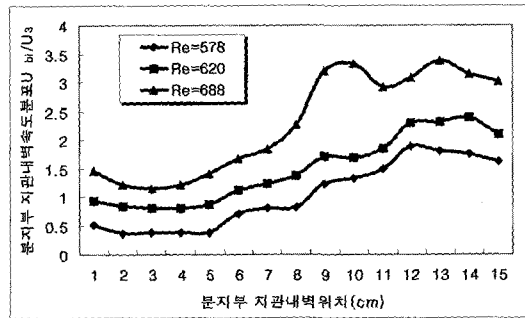


(b) 60° dividing duct

Fig. 5 Mean velocity along the external wall of main ducts.



(a) 90° dividing duct



(b) 60° dividing duct

Fig. 6 Mean velocity along the internal wall of branch ducts.

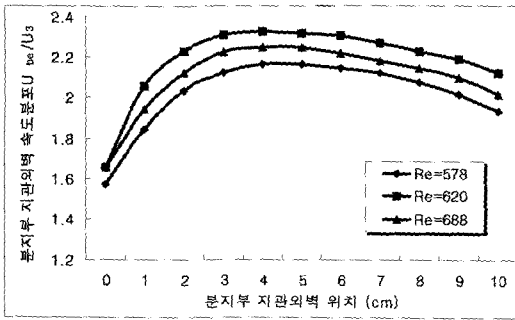
Fig. 5은 분지부의 주관의벽의 무차원 속도 값을 보여주고 있다. 90° 분지관에서는 유량 및 Re수가 증가하더라도 속도 값들은 비슷한 형태로 속도증가율이 감소 하지만 Re수가 증가할수록 증가율이 감소하는 비율이 더 작음을 알 수 있었으며, 60° 분지관에서는 유량 및 Re수가 증가할수록 각각의 속도 값들이 90°와는 다른 양상을 나타냈다. 분지관 입구에서 들어오는 속도들은 각각 60° 분지관에서 분지덕트의 주관 입구 쪽의 Re수가 578에서는 속도 값들의 변화가 매우 작아 일정하게 분포되었고, Re수가 620과 688에서는 90° 분지관처럼 감소율을 보인다. 하지만 90° 분지관과 달리 Re수가 증가할수록 감소율도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 분지부의 지관내벽의 속도 값들을 보여주고 있다. 90° 분지관은 벽에서 0.5mm~2cm까지는 급격히 속도가 감소하고, 그 이후부터는 완만한 감소를 나타냈다. 60° 분지관 분지부 지관내벽 속도는 90°와 달리 내벽 0.5mm~8cm까지 완만한 포물선 형태로 증가함을 알 수 있으며, 그 이후부터는 불규칙적으로 증

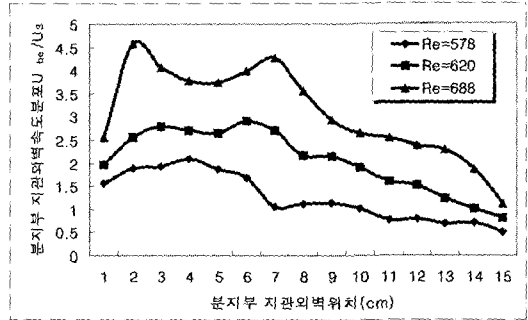
가됨을 알 수 있다. 이것은 60°가 90°보다 지관유입 유량이 상대적으로 많기 때문에 이 영향에 의해 분지관 분지부 지관의 유속이 더 증가하여 와류 현상이 나타난다고 사료된다.

Fig. 7은 분지부 지관의벽의 속도 값들을 보여주고 있다. 분지부 지관의벽 속도에서 90° 분지관의 속도 값은 본 실험 Fig. 2의 PIV 분석과 마찬가지로 최대속도 값이 나왔으며, 90° 분지관에서는 속도분포가 외벽 0.5mm에서 2cm까지는 증가하다가 그 이후부터는 일정하게 나타났다.

60° 분지관에서는 0.5mm~5cm 완만하게 증가하며, 그 이후부터는 90° 분지관 보다는 더 큰 비율로 감소됨을 알 수 있다. 즉, 90° 분지관에서의 분지부 주관의벽은 지관으로 들어가는 유동형태가 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타나듯이 90° 분지관 분지부 유동의 형태들이 그다지 큰 변화가 없으며, 90°에서와 달리 60°에서는 Fig. 6과 Fig. 7에서 지관의 내·외벽에서의 속도 변화 값들이 현저하게 90°에서 보다 복잡하게 보여줌을 알 수

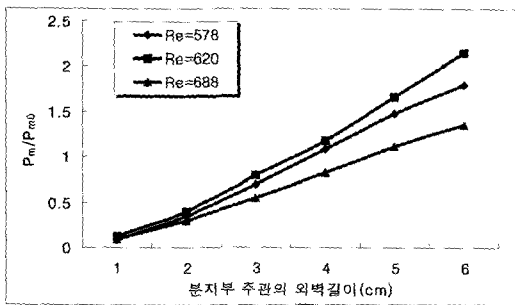


(a) 90° dividing duct

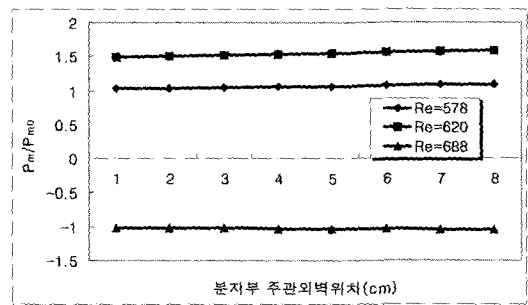


(b) 60° dividing duct

Fig. 7 Mean Velocity along the external wall of brunch ducts.



(a) 90° dividing duct



(b) 60° dividing duct

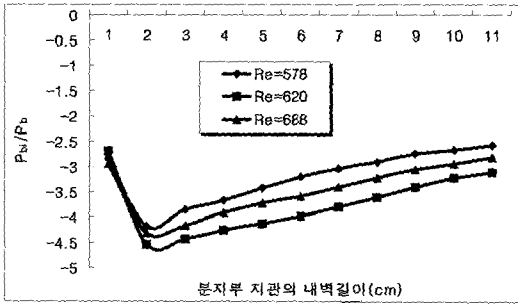
Fig. 8 The total pressures along the external wall of main ducts.

있다. 그것은 90°에서보다 60°에서는 분지부 지관으로 들어가는 유량과 레이놀즈가 증가하는 반면에 2차 유동의 영향 때문에 많은 와류가 발생됨을 알 수 있었다.

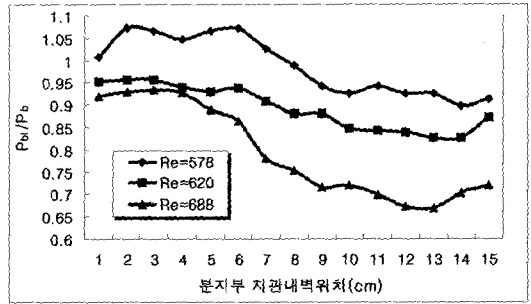
Fig. 8은 분지부 주관의외벽 압력분포를 보여주고 있다. 90° 분지관 분지부 주관의외벽의 속도분포들은 감소하는 반면에 압력분포들은 1차함수로 증가됨을 알 수 있으며, 60° 분지관 내의 압력분포들은 일정한 값으로 변화없이 일정한 분포를 나타남을 알 수 있으며, Re수가 688일때는 (-)압력분포를 나타남을 알 수 있다. 이것은 60° 분지관에서 Re수 688일 때 주관의외벽의 재부착지점 위치가 Re수가 578과 620일때보다 분지부 위쪽에서 발생되지면서 나타나는 현상이라고 사료된다.

Fig. 9과 Fig. 10은 각각 90°와 60° 분지관의 분지부 지관내벽·외벽 압력분포를 보여주고 있다. 90° 분지관은 분지부 내벽·외벽 모두에서 속도의 변화에 따른 압력들은 모두 (-)압력을 가지며, 외벽보다 내벽에서 보다 큰 (-)압력을 보여주고 있다. Fig. 9 나타나듯이 90° 분지관 지관내벽입구 쪽에서는 (-)압력이 급격하게 증가하며, 분지부 지관내벽의 3cm이후부터 완만하

게 감소함을 알 수 있으며, Fig. 10의 90° 분지관 분지부 지관의외벽에서는 5mm에서 4cm사이에서도 급격하게 (-)압력이 증가하다가 그 이후 지역부터는 변화가 매우 작은 값으로 감소 함을 알 수 있다. 90° 분지관에서 이와 같은 현상은 분지부 지관의 내벽에서는 속도가 감소함을 알 수 있으며, 이것은 상대적으로 주관의 외벽과 지관의 내벽에서 속도값이 매우 작게 분포됨을 알 수 있으며, 이와 같은 현상에 의해서 (-)압력이 상대적으로 크게 나타난다고 사료된다. 외벽에서도 (-)압력분포를 나타내지만 상대적으로 속도분포값들이 크게 나타남에 따른 큰 동압분포 값에 의해서 전체적인 지관의 내벽의 (-)압력보다 작은 압력 분포 값이 발생된다고 사료된다. 60° 분지관에서는 내벽·외벽에서 모두에서 90° 분지관과 달리 (-)압력이 발생하지는 않는다. 또한 90° 분지관 보다 상대적으로 매우 큰 압력올이 발생되지 않음을 알 수 있으며, 속도분포가 증가하면 감소하고, 속도분포가 감소하면 증가하는 형태로 분포됨을 알 수 있다. 60° 분지관에서는 90° 분지관의 압력 분포와 달리 보다 복잡한 형태의 압력 분포가 발생

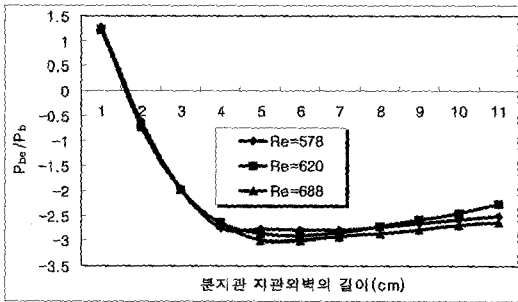


(a) 90° dividing duct

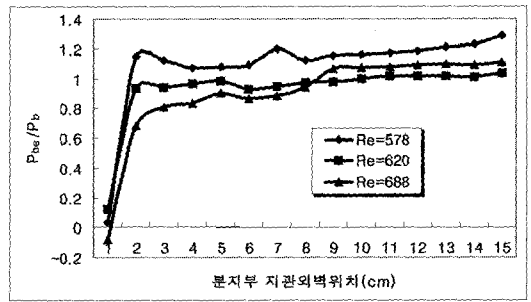


(b) 60° dividing duct

Fig. 9 The total pressure along the internal wall of branch ducts.



(a) 90° dividing duct



(b) 60° dividing duct

Fig. 10 The total pressure along the external wall of branch ducts.

되며, 이것은 지관으로 들어가는 속도분포가 90° 보다 더 복잡하고 빠른 속도분포에 의한 현상이며, 지관의 내벽보다는 외벽에서 압력분포의 증가율이 크게 나타남을 알 수 있으며, 90° 분지관에서는 지관내벽에서 유량의 유입량이 적었지만 60° 분지관 지관내벽에서는 유량의 유입량이 상대적으로 크기 때문에 내벽에 압력 분포 또한 90°와 달리 복잡한 형태로 나타남을 알 수 있다. 즉, 90° 분지관에서는 지관으로 들어가는 유량들이 원심력에 의해서 지관의 외벽쪽으로 많이 쏠리는 현상이 발생되지만, 60° 분지관에서 원심력에 의한 외벽 쪽으로 쏠리는 현이 작게 발생된다는 사실을 알게 되었다.

4. 결 론

90°와 60°분지 사각덕트의 주관과 지관의 유속을 변화시키면서 PIV를 이용한 유동가시화를 통해서 평균 속도벡터, 평균운동에너지와 CFD를 이용하여 분지부 주관의벽 근처와 지관의 내·외벽 (벽에서 5mm떨어진

부분) 속도변화 및 전 압력 분포를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PIV 실험 계측에 의한 최대속도 값과 CFD로 분석한 최대 속도 값은 평균 99.67% 일치하였다.
- 2) 90° 분지관에서는 지관으로 들어가는 유량이 증가할수록 지관의 외벽으로 유량이 원심력에 의해서 많이 쏠리는 현상이 발생되지만, 60° 분지관에서는 지관으로 들어가는 유량이 증가하더라도 원심력에 의한 지관의 외벽에 쏠리는 현상이 현저하게 감소되었다.
- 3) 90° 분지관에서는 지관의 내벽과 외벽에서 (-)압력이 나타났으며, 특히 지관의 내벽에서 큰 (-)압력이 작용했으며, 60° 분지관에서 지관에서 (-)압력은 발생되지 않았지만, 지관의 내벽에서 압력 변화율이 현저하게 감소함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원

을 받아 연구되었음

참고문헌

- 1) Ito, H., and Imai, K., 1973, "Energy Losses at 90degree Pipe Junction," J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 99, No. 9, pp. 1353~1368.
- 2) Blaisdell, F. W., and Manson, P. W., 1963, "Loss Energy a of Sharpedged Pipe Junction in Water Conveyance Systems," Tech. Bull, US Department of Agriculture, Washington, D. C, pp. 1283~1291.
- 3) Gardel, A., 1957, "Les Pertes de Charge Dans les Ecoulements au Travers de Branchments en Te. (Pressure Drops in Flows Through T-shaped Pipe Fitting] Bull Tech," Suisse Rom., Vol. 83, No. 9, pp. 123~130 (in French).
- 4) 김진형, 양창조, 김정환, 이영호, 2000, "PIV 애니메이션에 의한 가정용 냉장고 냉동실의 냉기순환 해석," 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(B), pp. 689~691.
- 5) 이행남, 박길문, 이덕구, 2001, "T-type 사각덕트내의 유동특성연구," 대한기계학회춘계학술대회 논문집, pp. 702~707.
- 6) Hager, W. H. 1987, "Discussion of Separation Zone a of Open-channel Junctions, by James L. Best and Ian Reid", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 133, No. 4, pp. 539~543.
- 7) Park, B. C., Cho, Young I., and Choi, Stephen, 1990, "Separation and Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe," J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, 37, pp.175~199.