

## T-분지관이 부착된 벤튜리관의 유동특성과 응축수 유입에 대한 수치해석 연구

A numerical study on the flow characteristics and condensed water inflow in the Venturi tube with T-branch tube

김승일<sup>1\*</sup>, 박상희<sup>2</sup>, 황정규<sup>3</sup>

S. I. Kim<sup>1\*</sup>, S. H. Park<sup>2</sup>, J. G. Hwang<sup>3</sup>

### 〈Abstract〉

This study was carried out numerically to investigate the flow characteristics in the Venturi tube with 90° T-branch tube and the inflow of condensed water into the Venturi tube from the branch tube. In this study, the diameter of the branch tube(1, 2, 3mm) and the neck diameter of the Venturi tube(0.3, 0.9, 1.5mm) were varied. The flow rate of the water at the Venturi tube inlet is 80cc/min and the water temperature is 288K. The condensed water temperature at the branch tube inlet is 355K. It was found that the velocity and pressure of the fluid near the branch point in the Venturi tube were more dependent on the diameter of the Venturi tube than the diameter of the branch tube. The temperature of the mixed water at the exit of the Venturi tube was the highest when the Venturi tube's neck diameter is 0.9mm and the branch tube diameter is 2mm. This means that the condensed water is flowing well through the branch tube.

*Keywords : Steam generator, Venturi tube, T-Branch tube, CFD, Condensed water*

---

1 금오공과대학교 기계공학과 대학원

2\* 정희원, 교신저자, 금오공과대학교 기계공학과, 교수  
E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

3 금오공과대학교 기계공학과 대학원

1 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

2\* Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor

3 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

### 1. 서론

스팀 발생기에 의해 만들어진 스팀(steam)은 적절한 온도와 압력으로 조절하여 사람 얼굴의 피부미용 관리용, 병원에서 코와 목의 치료용 그리고 기름 등과 같은 오염물제거용으로 많이 사용되고 있다.

Fig. 1(a)는 피부미용 관리용으로 사용되는 스팀 발생기의 내부 구조와 스팀의 발생 과정 및 응축수 회수 과정을 나타낸다. 스팀발생기에서 만들어진 스팀은 장치의 스팀 토출구를 통하여 대기 중으로 연속적으로 배출되면서 분사구 내부에서는 스팀이 응축되게 된다. 응축된 스팀은 장치 내부의 응축수 회수관을 통하여 장치 하단에 설치된 응축수 회수통으로 배출되게 된다. 회수통에 저장된 응축수는 장시간 보관 시 세균 오염이나 물의 넘침이 발생하여 회수통의 물을 자주 버리는 번거로움으로 인해 사용자들의 불만이 증가되고 있다.

이와 같은 기존 스팀 발생기의 문제점을 개선시키기 위해 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같은 방법으로 기존의 스팀발생기에서 발생한 응축수 배

출방법을 개선하고자 한다. 즉 응축수 회수관을 스팀발생부와 물 공급펌프 사이의 주유동관에 90° T자형으로 연결하여 스팀 토출부에서 발생한 응축수가 회수되도록 밀폐된 유로를 구성하였다. 이 방법은 응축수를 회수하여 재사용하므로 에너지 절감, 응축수 처리문제 등을 해결하는 효과를 얻을 수 있다.

주유동관에 설치된 분지관에 대한 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Sparrow와 Kemink[1]는 분지관을 통한 주유동관으로의 유체회수에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이들은 분지관의 유체 회수가 주유동관의 열전달 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 보였다. Hayes 등[2]은 90° 분지관이 부착된 유동관 내의 유동특성을 수치해석으로 연구하였다. 이들은 출구 압력이 일정할 때 분지 유량이 유속에 의존함을 보였다. Suh 등[3]은 분지관 유동에서 뉴턴유체와 비뉴턴유체가 흐를 때 유동특성에 대하여 수치해석으로 연구하였다. Neary와 Sotiropoulos[4], Kim과 Son[5]은 정사각형 단면에 90° T-분지관을 설치하여 유량을 변화시켜 유동특성을 수치해

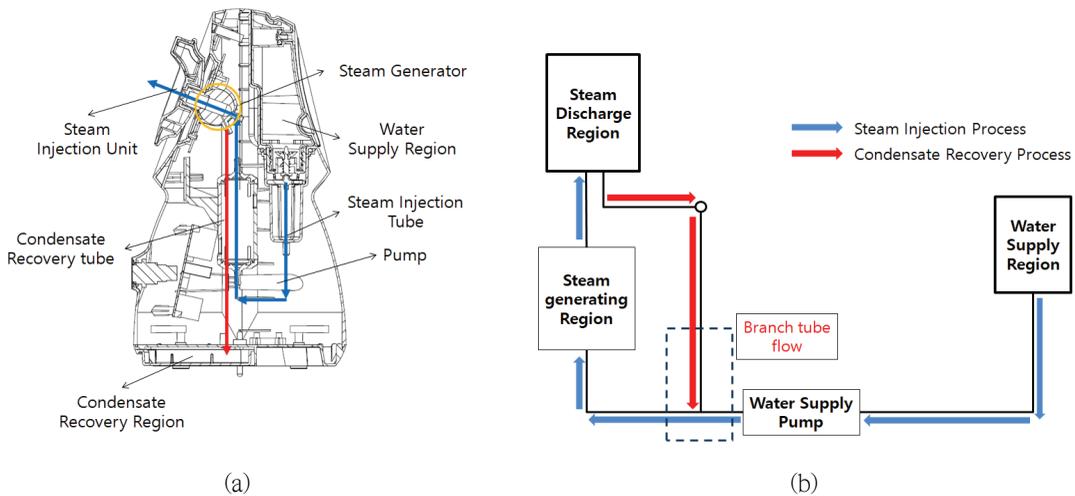


Fig. 1 Steam generator(a) and Condensed water recovery system(b)

석적으로 연구하였다. Park 등[6]은 주유동관에 다양한 형상의 분지관을 설치하여 분지관 내의 유동 특성에 대해 수치해석 연구를 수행하였다.

상기의 연구는 단면적이 일정한 주유동관에 T자형 분지관을 설치하여 주유동관에서 분지관으로 유량이 분배될 때 주유동관과 분지관 내의 유동 특성에 대해서만 연구하였다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 주유동관을 벤투리관으로 하였으며, 벤투리관의 목 부분에 90° T-분지관을 부착하여 응축수 회수 시스템을 구성하였다. 이 시스템에서 유체의 흐름은 주유동관에 공급된 물이 벤투리관의 목 부분을 통과하면서 유속이 증가하여 분지점(벤투리관과 분지관이 연결된 지점)에서 압력이 감소하게 되어 분지관 내의 응축수가 분지점으로 흘러들어오게 된다. 이 분지점에서 온도가 다른 두 유체가 합쳐지면서 혼합되어 혼합수가 된다. 이 혼합수가 벤투리관의 출구를 통해 스팀발생부로 흘러들어가게 된다.

따라서 본 연구에서는 벤투리관에 응축수 회수를 위한 T-분지관을 연결하여 벤투리관과 분지관 내의 유동특성과 응축수 유입을 연구하기 위해 수치해석을 수행하였다. 이 연구에서는 응축수 회수관의 직경과 벤투리관의 목 직경을 변화시켜 해석에서의 변수로 설정하였다.

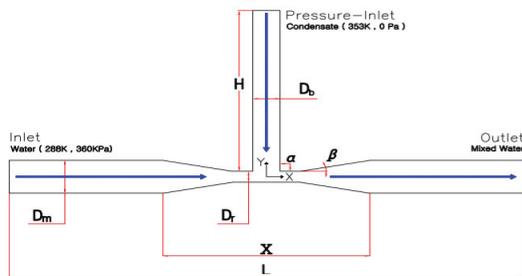


Fig. 2 A numerical model for the Venturi tube with T-type branch tube

## 2. 해석 모델 및 방법

Fig. 2는 벤투리관의 목 부분에 응축수 회수관인 90° T-분지관이 부착된 수치해석의 모델을 나타낸다.

주유동관인 벤투리관 입출구의 직경은  $D_m=3\text{mm}$ 이고, 목 직경은  $D_r=0.3, 0.9, 1.5\text{mm}$ 로 변화시켰다. T-분지관의 길이는  $H=30\text{mm}$ 이고 직경은  $D_c=1, 2, 3\text{mm}$ 로 변화시켰다. 벤투리관의 발산각(divergency angle)은  $\beta=5^\circ$ , 분지관과 벤투리관이 이루는 각도는  $\alpha=90^\circ$ 이다. 벤투리관의 전체 길이는  $L=100\text{mm}$ 이고, X는 벤투리관의 입구에서 단면적이 축소되는 지점부터 분지점 이후 다시 단면적이 확장되는 지점까지의 길이이다. 벤투리관 입구의 유량은  $80\text{cc/min}(0.19\text{m/s})$ 로 설정하였고, 입구 레이놀즈 수는 500으로 층류유동에 해당한다.

본 연구의 분지관이 부착된 벤투리관의 해석은 2차원 정상상태 유동 조건으로 하였다. 유체의 이동과 에너지 전달의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식 그리고 에너지방정식을 이용하여 유한체적법(FVM)으로 이산화하였다. 지배방정식의 해석은 압력과 속도의 연계를 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

격자는 유동장 전체를 Triangles로 설정하였고, 유동해석의 정확성을 위해 격자의존성 테스트 후 40만개로 결정하였다.

해석 모델의 경계조건으로 벤투리관 입구의 물온도는 288K, 유량은 80cc/min의 물이 유입되도록 설정하였다. 분지관의 입구의 압력은 대기압 조건을, 응축수 온도는 353K로 설정하였다. 벤투리관의 출구 영역은 대기압 조건에 의해 혼합된 물이 유출되도록 설정하였다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 분지관 직경에 따른 수치해석 결과

Fig. 3은 벤츠티관 입출구의 직경  $D_m=3\text{mm}$ , 목 직경  $D_r=0.3\text{mm}$ 로 일정할 때 분지관의 직경  $D_b=1, 2, 3\text{mm}$ 에 따른 벤츠티관과 분지관 내의 유체의 속도분포를 나타낸다. 주유동관 입구의 물의 속도가  $0.19\text{m/s}$ 이다.

벤츠티관 내의 유체의 속도 변화는 단면적이 일정한 주유동관에서 물이 유입되어 유동단면적이 점차적으로 감소되는 벤츠티관 내를 흐르면서 속도가 서서히 증가하다가 벤츠티관의 목 부분을 통과하면서 유속이 급격하게 증가하게 된다. 이 유체가 분지점을 통과하면서 응축수와 혼합되어 분지점 이후의 영역에서 최대의 속도 영역(적색)이 발생하고 단면적이 서서히 증가함에 따라 혼합수의 유체속도가 점차적으로 감소함을 보였다. 이러한 속도분포는 분지관의 직경과 무관하게 비슷한 경향을 보였다.

벤츠티관에 부착된 분지관 직경  $D_b=1\text{mm}$ 경우에는 벤츠티관 내의 분지점 이후 최대 속도영역(적색)이 출구방향으로 길게 뻗어 나가는 것을 보였고, 최대속도의 크기는  $0.9\text{m/s}$  정도로 나타났다. 이 증가된 유속은 관의 확대로 인해 주유동관의 출구영역에서  $0.2\text{m/s}$ 로 되었다. 이 때 분지관 내의 응축수는 물의 가속유동에 의해 분지점으로 빠르게 흘러들어오는 것을 보였다. 그러나  $D_b=2\text{mm}$ 인 경우에는 분지관 내에서 응축수의 작은 재순환유동이 발생하면서 응축수가 유입되었고,  $D_b=3\text{mm}$ 에서는 재순환유동이 더욱더 크게 발생함을 보였다. 이러한 재순환 유동의 크기의 증가로 인해 응축수 유입이 줄어들면서 분지점 이후의 최대 속도 영역은  $D_b=2\text{mm}, 3\text{mm}$ 로 증가할수록 점차로 축소됨을 보였다.

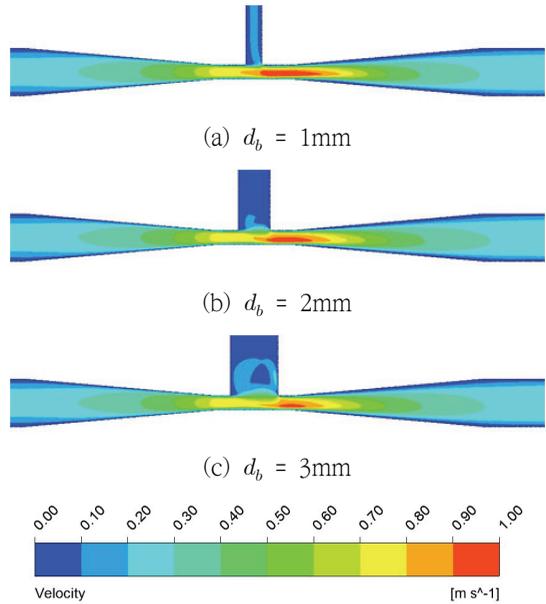


Fig. 3 Velocity distribution of the Venturi tube and the branch tube for the diameter of branch tube

이것은 벤츠티관에서 흐르는 물이 분지관 내로 유입되어 발생한 응축수의 재순환유동과 분지관이 부착된 목 부분의 길이 그리고 분지점에서의 압력과 서로 상호 관련이 있는 것으로 예측된다.

Fig. 4는 벤츠티관 입출구의 직경  $D_m=3\text{mm}$ , 목 직경  $D_r=0.3\text{mm}$ 일 경우에 분지관의 직경( $D_b$ )에 따른 벤츠티관과 분지관 내의 유체의 압력분포를 나타낸다. 분지관 직경은  $D_b=1, 2, 3\text{mm}$ 이고 벤츠티관 입구 압력은  $360\text{kPa}$ 이다.

벤츠티관 내의 유체의 압력 분포는 유동단면적이 점차적으로 감소함에 따라 압력이 서서히 감소하다가 벤츠티관 내의 분지점 부근에서부터 음(-)압력이 시작되어 분지점 이후 영역부터 최소 음(-)압력분포 영역(하늘색)이 하류방향으로 발생하고 직경이 서서히 증가함에 따라 유체의 압력도 점차적으로 증가함을 보였다. 이러한 압력분포는 분지관의 직경이 변화하여도 비슷한 양상을 보였

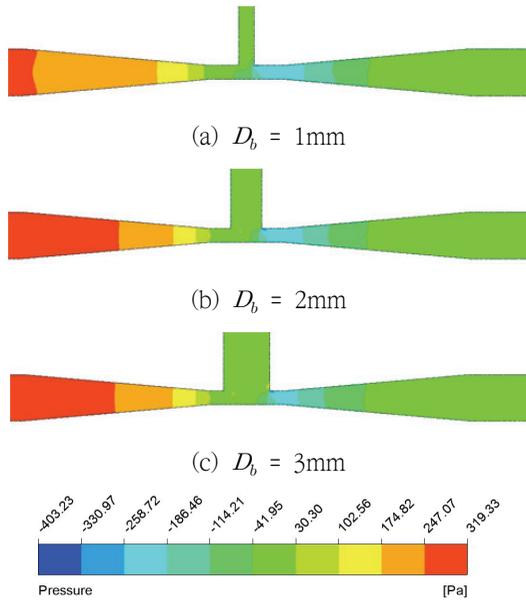


Fig. 4 Pressure distribution of the Venturi tube and the branch tube for the diameter of branch tube

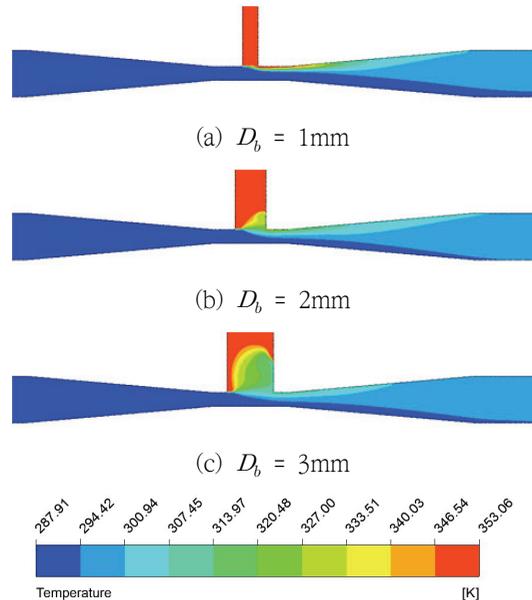


Fig. 5 Temperature distribution of the Venturi tube and the branch tube for the diameter of branch tube

다. 그리고 벤투리관 내의 압력분포는 예측한대로 Fig. 3의 속도분포와 서로 반대 현상으로 나타남을 보였다.

또한, 분지관 직경 1mm일 때 벤투리관 내의 분지점의 압력은 -258.72Pa 정도이고, 2mm와 3mm에서는 각각 -114.21Pa, -41Pa 이며, 직경이 증가할수록 압력은 더 높아짐을 보였다.

이와 같은 결과는 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 분지관 직경 2mm에서 재순환영역이 발생함으로 인해 분지관을 통해 유체가 유입되어 분지관 내부와 목부분의 압력차가 감소함으로 인해 나타나는 것으로 예측된다.

분지관 직경  $D_b=1, 2, 3\text{mm}$ 의 변화에 따른 벤투리관과 분지관 내의 유체의 온도분포는 Fig. 5에 나타내었다. 벤투리관 입구의 물 온도는 288K이고 분지관 입구의 응축수 온도는 353K이다.

분지관 직경  $D_b=1\text{mm}$ 일 때 벤투리관과 분지관

내의 온도분포는 벤투리관 입구에서 288K로 유입된 물이 벤투리관의 분지점까지 일정한 온도를 유지하다가 분지점을 지나면서 온도가 서로 다른 3개의 층을 이루면서 벤투리관의 출구까지 나타났다. 이러한 3개의 온도분포층은 벤투리관 입구에서 유입된 물이 벤투리관의 하부영역에서 두꺼운 층으로 분포하고, 분지관으로부터 유입된 응축수는 벤투리관 상부영역에서 매우 얇은 층으로 분포하고 있다. 그리고 이들 두 유체 층 사이에는 두 유체가 혼합되어 적절한 온도를 가진 혼합수가 분포함을 보였다.

$D_b=2\text{mm}$ 인 경우에는 분지관 내에서 유체의 재순환유동이 발생하여 물과 응축수가 혼합되면서 혼합수의 온도분포가 더욱더 두꺼워짐을 보였다. 그러나 3mm의 경우에는 보다 큰 재순환유동이 응축수 유입을 방해하여 혼합수의 온도는 더 낮아짐을 보였다. 벤투리관 출구의 혼합수의 평균온도

는 각각 297K( $D_b=1\text{mm}$ ), 299K( $2\text{mm}$ ), 296K( $3\text{mm}$ )이다.

따라서 벤츄리관에 부착된 분지관의 직경은 2mm 정도가 응축수 유입에 가장 효과적임을 알 수 있었다.

### 3.2 분지관 직경과 벤츄리 목 직경 변화에 따른 수치해석 결과

Fig. 6은 벤츄리 목 직경이  $D_r=0.3, 0.9, 1.5\text{mm}$ 일 때 분지관 직경에 따른 속도분포를 나타낸다. 벤츄리관 입출구의 직경은 3mm이다. 벤츄리관 입구 속도는 0.19m/s이다. 그림에서 적색 수직 점선은 분지점의 위치를 나타내고, 흑색 수직 점선의 간격은 Fig. 2에서 나타난 것처럼 벤츄리관의 축소구간, 목부분, 확대구간으로 x로 표시하였다.

Fig. 6(a)와 같이  $D_r=0.3\text{mm}$ , 분지관 직경  $D_b=1\text{mm}$ 일 때 벤츄리관 내의 유체의 속도는  $x=-12\text{mm}$ 이전부터 유속이 서서히 증가하여 단면적이 급격히 줄어드는  $x=-7\text{mm}$ 부터 급격하게 증가하여  $x=-2\text{mm}$ 에서 최대속도(2.5m/s)를 보였다.  $x=-2\sim 2\text{mm}$ 영역에서 속도가 감소하다가 다시 증가하였고  $x=2\text{mm}$ 이후부터 출구까지 계속 감소함을 보였다. 이러한 벤츄리관 내의 속도변화는  $D_b=2\text{mm}$ 와  $3\text{mm}$ 에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

$D_r=0.3\text{mm}$ 에서 분지관 직경에 따른 분지점 주변( $x=2\sim 4\text{mm}$ )의 유체의 속도는 크게 불규칙하게 변화함을 나타내었으며, 최대속도와 발생한 위치가 거의 동일함을 보였다.

Fig. 6(b)와 같이  $D_r=0.9\text{mm}$ 일 때  $D_b=1\text{mm}$ 에서의 벤츄리관 내의 유체 속도는  $x=-14\text{mm}$ 부터 급격하게 증가하다가  $x=-1\sim 2\text{mm}$ 까지 속도가 약

간 감소하였다. 속도는  $x=2\text{mm}$ 이후부터 다시 증가하여 3mm지점에서 최대속도(0.86m/s)를 보였다. 3mm이후부터 출구까지 속도는 급격하게 감소함을 보였다. 이러한 벤츄리관 내의 속도변화는 분지관 직경 2mm와 3mm에서도 비슷한 경향을 보였으나, 최대속도는 2mm(0.9m/s,  $x=3\text{mm}$ )와 3mm(0.98m/s,  $x=2\text{mm}$ ) 다소 차이가 있었다.

그러나  $D_r=0.9\text{mm}$ 에서의 분지관 주변의 유체의 속도는  $D_r=0.3\text{mm}$ 의 경우보다 많이 감소하였으며, 분지관 직경의 변화에 따라 속도차이가 크게 감소함을 보였다..

$D_r=1.5\text{mm}$ ,  $D_b=3\text{mm}$ 일 때 분지관 직경에 따른 벤츄리관 내의 유체의 속도 변화는 Fig. 6(c)에 보였다. 속도는  $x=-10\text{mm}$ 부터 급격하게 증가하여 3mm위치에서 최대속도를 보였다. 유체의 최대속도는  $x=3\text{mm}$ 에서  $D_b=1\text{mm}$ 의 경우 0.5m/s이고, 2mm(0.54m/s) 그리고 3mm(0.53m/s)이다.

따라서 벤츄리관의 목 직경에 따른 유체의 속도는 목 직경이 증가할수록 속도는 크게 감소함을 보였다.

Fig. 7은 벤츄리 목 직경이 각각  $D_r=0.3, 0.9, 1.5\text{mm}$ 일 때 분지관 직경에 따른 압력분포를 나타낸다. 벤츄리관 입구압력은 360kPa이다.

Fig. 7(a)와 같이 벤츄리 목 직경이 0.3mm일 때 벤츄리관 내의 유체의 압력은 분지관의 직경에 관계없이 거의 유사한 경향을 보였다. 즉 압력은  $x=-7\text{mm}$  위치에서 압력이 급격하게 감소하면서  $x=2.5\text{mm}$  지점에서 최소압력(-1500Pa)이 발생하였다.  $x=2.5\text{mm}$ 이후부터 압력이 서서히 증가하다가  $x=12\text{mm}$ 부터는 일정하게 유지되었다. 최소압력은  $D_b=1\text{mm}$ 에서는 -800Pa, 2mm에서는 -1,200Pa, 3mm에서는 -1500Pa로 모두  $x=2.5\text{mm}$  지점에서 발생하였다.

$D_r=0.9\text{mm}$ (Fig. 7(b))일 경우 유체의 압력은  $x=-14\text{mm}$ 에서부터 압력이 서서히 감소하다가

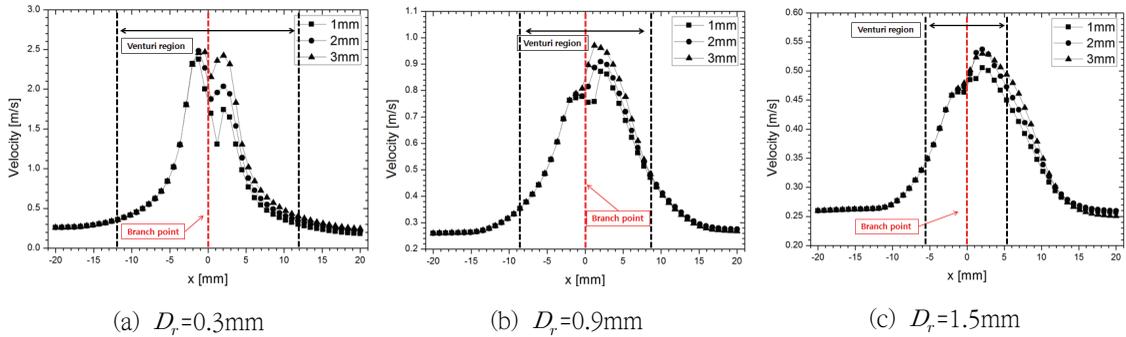


Fig. 6 Velocity distribution in the Venturi tube for diameter of branch tube

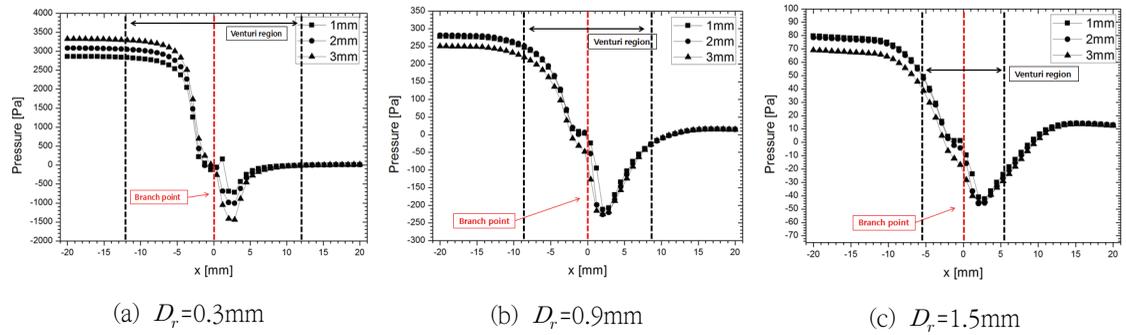


Fig. 7 Pressure distribution in the Venturi tube for diameter of branch tube

$x = -6\text{mm}$ 에서 압력이 급격하게 감소하여  $x = 2\text{mm}$  위치에서 최저압력이 발생하였다.

이 압력변화는 분지관의 직경에 관계없이 거의 유사한 경향을 보였다. 벤츠티관 내의 유체의 최소압력은  $-220\text{Pa}$  ( $D_b = 1\text{mm}$ ),  $-240\text{Pa}$  ( $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ ) 이고 모두  $x = 2\text{mm}$ 에서 발생하였다. Fig. 7(c)의 목직경  $1.5\text{mm}$ 의 압력변화는  $D_r = 0.9\text{mm}$ 의 경우와 유사한 경향을 보였고 최저압력이 발생하는 위치( $x = 2\text{mm}$ )도 동일하였다. 유체의 최소압력은 각각  $-40\text{Pa}$  ( $D_b = 1\text{mm}$ )과  $-42\text{Pa}$  ( $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ )이다.

따라서 벤츠티관의 목 직경이 증가할수록 유체의 압력은 크게 증가하였고, 벤츠티관의 목 직경이 감소할수록 압력은 분지관 직경에 크게 의존함을 보였다. 최소압력의 위치도 거의  $x = 2 \sim 2.5\text{mm}$  부근에서 발생하였다.

Fig. 8은 벤츠티관 목 직경( $D_r$ )과 분지관 직경( $D_b$ )에 따른 벤츠티관 내의 유체의 온도분포이다. 벤츠티관 입구의 물은 온도는  $288\text{K}$ 이고, 분지관 입구의 응축수 온도는  $353\text{K}$ 이다.

Fig. 8(a)는  $D_r = 0.3\text{mm}$ 일 때 유체의 온도는  $D_b = 1\text{mm}$ 와  $2\text{mm}$ 에서는 온도변화가 없으며,  $D_b = 3\text{mm}$ 에서 유체 온도가  $0.8\text{K}$  상승하였다. 이와 같은 결과는 분지관을 통해 응축수가 벤츠티관으로 유입되지 않았음을 의미한다.

Fig. 8.(b)인  $D_r = 0.9\text{mm}$ 일 때  $D_b = 1\text{mm}$ 의 경우에는  $x = 0\text{mm}$ 부터 유체온도가 급격히 상승하여  $x = 6\text{mm}$  지점에서 온도가  $298\text{K}$ 으로 최대로 상승하였다가 감소하여 출구온도가  $297.2\text{K}$ 을 나타냈다.  $D_b = 2\text{mm}$ 의 경우  $x = 6\text{mm}$ 에서 유체의 온도가  $299.5\text{K}$ 으로 최대가 되었고, 출구온도가  $298.4\text{K}$ ,

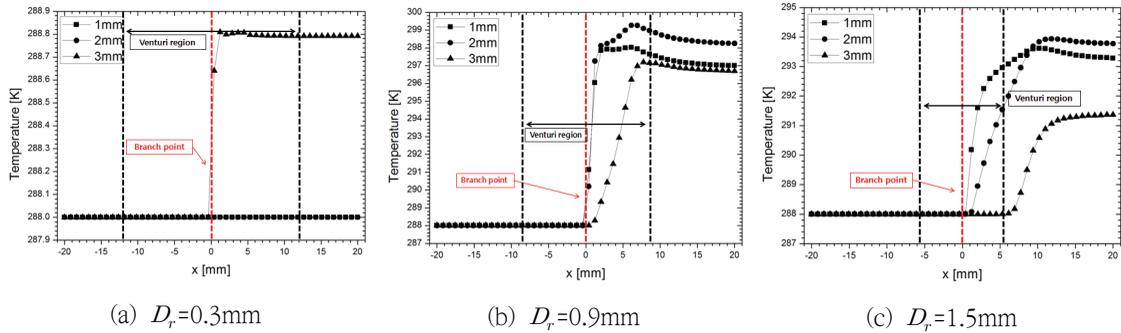


Fig. 8 Temperature distribution in the Venturi tube for diameter of branch tube

$D_b=3\text{mm}$ 에서는  $x=8\text{mm}$  지점에서 유체의 최대온도가 297.5K, 출구온도가 297K으로 나타났다.

Fig. 8.(c)의  $D_r=1.5\text{mm}$ 일 때  $x=0\text{mm}$ 부터 유체의 온도가 급격히 상승하여  $D_b=1\text{mm}$ 인 경우  $x=11\text{mm}$  지점에서 최대온도 293.5K, 출구온도 293.2K,  $D_b=2\text{mm}$ 에서는  $x=12\text{mm}$ 에서 최대온도 294K, 출구온도 293.8K 그리고 3mm의 경우에는 계속적으로 온도가 증가하는 경향을 보였다.

따라서 벤츄리관의 목 직경이 0.9mm이고 분지관의 직경이 0.2mm일 경우 유체의 온도가 가장 높게 상승함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구는 벤츄리관에 90° T-분지관을 설치하여 벤츄리관 내의 유동변화와 분지관을 통해 응축수 유입을 조사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 이 연구를 수행하기 위해 분지관 직경과 벤츄리관의 목 직경을 변화시켜서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 벤츄리관의 목 직경이 증가할수록 유체의 속도는 크게 감소하였다. 분지관의 직경이 증가할수록 분지관 내에는 재순환유동이 발생하였다. 특

히 분지관 직경이 2mm에서는 분지관 내에서 작은 재순환유동으로 인해 분지관 내의 응축수가 벤츄리관의 분지 영역으로 잘 유입됨을 알 수 있었다.

(2) 벤츄리관의 목 직경이 증가할수록 유체의 압력은 크게 증가하였다. 분지관의 직경이 작을수록 벤츄리관 내의 분지영역에 더 낮은 음(-)압력을 발생시켜서 벤츄리관 내로 응축수 유입에 더 효과적임을 알 수 있었다.

(3) 벤츄리관 목 직경이 0.9mm이고 분지관 직경 2mm일 때 벤츄리관 출구의 혼합수의 평균 온도는 299K으로 가장 높았으며, 이것은 분지관의 응축수가 벤츄리관으로 가장 잘 유입됨을 의미한다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] E. M. Sparrow, R. G. Kemink, “Heat Transfer Downstream of a Fluid Withdrawal Branch in a Tube” *Journal of Heat Transfer*, vol.101, pp. 23-28, (1979).
- [2] R. E. Hayes, K. Nandakumar and H. Nasr-El-Din, “Steady Laminar Flow in a 90 degree planar Branch” *Computer & Fluids*, vol. 17, no. 4, pp. 538-553, (1989).
- [3] Suh, S. H., Yoo, S. S., Roh, H. W., “Numerical Analysis of Branch Flows for Newtonian and Non-Newtonian Fluids” *The Korean Society of Mechanical Engineers* vol.18, no. 10, pp. 2762-2772, (1994)
- [4] V. S. Neary and F. Sotiropoulos, “Numerical investigation of laminar flows through 90-degree diversions of rectangular cross-section” *Journal of Computer & Fluids*, vol.25, no. 2, pp. 95-158, (1996).
- [5] Kim, Y. M., Son, H. J., “Numerical Study of the Flow Field in a 90-Degree T-Branch of Square Cross-Section” *Journal of the Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol.25, no. 2, pp. 171-176, (1997).
- [6] Park, S. H., Kim, S. K., Ha M. Y., “Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Pipes with Various Shapes” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, vol.37, no. 11, pp. 999-1007, (2013).

---

(접수: 2018.11.15. 수정: 2019.02.22. 게재확정: 2019.03.08.)