

## 액체금속로 중간열교환기 관다발에서의 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on Pressure Drop Characteristics in a Tube Bundle in An Intermediate Heat Exchanger of Liquid Metal Reactor

최석기, 최일곤, 이길용, 김종만, 박진호, 남호운

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

액체금속로 중간열교환기 내의 관다발에서의 압력강하 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 관다발과 유동방향 사이의 각도 변화에 따른 압력강하를 측정할 수 있는 실험장치를 설계, 제작, 설치하고, 유속에 따른 압력강하를 측정하였다. 유동방향과 관다발 사이 각에 따른 5개의 시험부(90°, 75°, 60°, 45°, 30°)에 대하여 관 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수 3000-40000의 범위에서 실험을 수행하였다. 무차원화된 압력강하의 값은 레이놀즈 수에 대하여 음수의 자승으로 변화하였으며, 유동방향과 튜브와의 각도가 증가할수록 무차원화된 압력강하의 값이 증가하였다.

#### Abstract

An experimental study of measurement of pressure drop in a tube bundle in a liquid metal reactor intermediate heat exchanger is performed. An experimental facility that can measure the pressure drop according to the angle between tube bundle and flow direction is designed, manufactured and installed, and the pressure drop is measured varying the flow rate and test sections which have different inclined tube angles. Experiments are conducted for five different inclined tube angles (90°, 75°, 60°, 45°, 30°) in a Reynolds number range of 3000-40000 based on the tube diameter. The measured experimental data show that the dimensionless pressure drop varies negative power of Reynolds number and the magnitude of dimensionless pressure drop increases with the inclined tube angle.

#### 1. 서론

액체금속로 중간열교환기 내의 유동현상과 열전달 현상을 정확하게 파악하는 것은 액체금속로 설계에서 매우 중요하다. 액체금속로 중간열교환기 내부는 관다발(tube bundle)로 이루어진 전열관 및 기타 내부 구조물의 복잡성 때문에 유동 및 열전달 해석시 일반 전산유체역학 방법 대신 다공성 매질법(porous media approach)을 주로 사용하고 있다. 이 방법에서는 내부구조물을 지나가는 유동을 유체의 마찰을 고려한 마찰저항항으로 처리하게 되는데 이 항은 일반적으로 실험으로부터 얻어진다. 따라서 해석의 정확도가 이 항의 정확도에 크게 의존하기 때문에 액체금속로 중간열교환기를 정확하게 해석하고 설계하기 위해서는 유동 속도, 유동 각 그리고 온도 범위 등 다양한 유동 조건에 적용할 수 있는 일반적이고도 정확한 실험상관식이 요구되는 것이다.

관다발을 지나는 유동에 대한 열전달 및 수력학적 항력은 열수력학 분야에서 다양한 유동 범위에 걸친 복잡한 기하학적 형상을 가지는 고전적 문제로 실험 및 해석 분야 양쪽에서 오랜 동안 관심의 대상이 되어왔다. 여기에서는 이 중에서 엇갈린 배치를 가지는 관다발을 지나는 유동의 수력학적 결과를 중심으로 살펴보았다.  $Re=1\sim 1000$ 인 층류 영역에 대하여 전체적인 압력 강하와 열전달 계수를 측정된 것(1)을 시작으로 다양한 관다발 배열에 대한(2,3) 연구를 수행하였으며 1952년도에는 천이 영역까지 확장되었다(4). Jones, C.E. and Monroe, E.S.(5)와 Gram, A.J., Mackey, C.C. and Monroe, E.S.(6)은 동일 선상(in-line)의 관다발에 대하여 저임계 영역(subcritical region)까지 측정하였으며 그 후 임계 영역(7) 및 초임계(supercritical)와 천이임계(transcritical)영역으로 실험적 연구를 확장시켰다(8). Neal, S.B.H.C. and Hitchcock, J.A.(9)는 난류 및 국부 열전달 계수를 측정하였다. 과거에는 위와 같이 주로 설계 목적상의 실험적 연구가 수행되어왔으며 A. Zukauskas(10)는 이에 대한 자세한 정리를 하였다. A. Zukauskas는 관다발에 대한 열수력학적 실험 결과를 일반화하기 위해서는 기준 속도와 압력 강하가 일어나는 열의 수를 정의하는 것이 매우 중요하다고 하였다. 지금까지의 연구들이 열전달이나 압력 강하 특성에 대한 연구가 대부분이었던 반면 Umeda et al는 최근에 그러한 결과를 낳는 메카니즘에 대한 연구를 수행하였다(11). 그들은 입자 추적법(the particle tracing method), LDV를 이용한 유동 가시화와 piezometer를 이용한 압력장 측정을 수행하여 엇갈린 관다발에서의 유동 특성은 von Karman vortex street와 X-형상의 교차하는 주유동과의 상호작용으로 결정된다고 하였다. 또한 수정 레이놀즈 수를 압력 강하 계수와 함께 정의하였다. 앞서의 연구들은 모두 관다발이 주 유동 방향에 수직인 반면 경사진 관다발의 경우에 대한 연구는 많지 않다. Kazakevich, F.P.(12)는  $Re=300$  이상에서 일정하게 경사진 유동에 노출된 관다발의 공기역학적 항력에 대한 측정을 하였으나 제한된 범위에서의 실험으로 그 결과가 불확실하다. Kirsch, D. and Schleisiek K.(13)는 액체 금속 고속 증식로에서의 장애물 문제에 관련된 경사 관다발에 관한 실험을 수행하였으나 당연히 기하학적 형상에 대한 제한으로 그 경사 효과에 대한 결과를 얻기가 어려웠다. 가장 일반적인 경우에 대한 결과는 Lokshin, V.A., Mochan, S.I. and Fomina, V.A.(14)이다. 한편 국내에서의 그간의 연구 결과를 살펴보면 대부분 축방향 유동에서의 관다발 유동이 대부분이며(15, 16) 특히 주 유동이 관다발과 각을 이루고 있는 경우에 대한 연구는 전무한 실정이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 지금까지 문헌상에 보고된 마찰력에 대한 상관식들은 대부분 매우 오래 전에 개발된 것들이고, 주로 유체가 관다발에 횡 또는 축방향으로 흐르는 경우에 대한 상관식들이 대부분이다. 특히 관다발과 유동방향이 이루는 각에 대한 영향을 고려한 것은 극히 드물 뿐만 아니라 그 정확도에 대한 검증이 이루어지지 않고 있다. 본 연구의 주 목적은 액체금속로 중간열교환기 열유동 설계 및 열유동 해석에 필요한 전열관과 유동과의 마찰력에 대한 상관식을 실험적으로 도출하는데 있다. 이를 위하여 액체금속로 중간열교환기 내부 관다발의 배치에 따른 유동방향이 각도 변화에 따른 압력강하를 측정할 수 있는 실험장치를 설계, 제작, 설치하고, 유속에 따른 압력강하의 값을 측정하였다. 유동방향과 전열관의 각도가 다른 5개의 시험부에 대하여 튜브 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수 3000-40000의 범위에서 실험을 수행하였다. 본 실험장치는 또한 수직 관다발에서의 압력강하 및 노심설계에 필요한 실규모, 실중량 모의 핵연료집합체에서의 압력강하 및 유체유발 진동준위 및 응답주파수까지도 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 본 연구는 수직 및 경사 관다발의 횡 유동에 대하여 압력 강하에 대한 상관 관계식을 도출하여 이에 대한 유용한 설계식을 제공하고자 하는 것이다. 여기에서는 본 실험장치의 설계 및 제작과 지금까지 실험을 완료한 관다발을 지나는 횡방향 유동에서 유동과 관다발이 이루는 각도가 다른 5개의 시험부에 대한 압력강하 특성 측정 및 실험결과를 설명하고자 한다.

## 2. 실험장치

실험장치는 Fig.1에서 보는 바와 같이 3개의 시험부와 공용 루프로 구성되어 있는데 횡방향 유동내 관다발 실험을 위한 수평 시험부(horizontal test section)와 축방향 유동에서의 관다발 실험을 위한 수직 시험부(vertical test section) 및 집합체 시험부(assembly test section)로 구성되어 있으며 각 시험부 양단에 설치된 밸브를 통하여 각 시험부는 독립적으로 운영 될 수 있도록 하였다. 공용 루프는 물 공급탱크, 주 펌프, 댐퍼 및 2개의 매니폴드로 구성되어 있다. 횡방향 유동내 관다발 실험을 위한 수평 시험부를 중심으로 실험장치의 각 부분을 간단히 요약하면 다음과 같다.

### 물 공급탱크

물의 증량과 설치되는 자중 및 유입 유체에 의한 변형이 일어나지 않도록 두께 5mm의 SUS304 강판으로 제작된 물 공급탱크는 내경 1500mm, 높이는 4000mm가 되며 대략 5톤 정도의 물을 채울 수 있다. 향후 계획중인 열전달 실험을 위하여 1000mm 높이에 용량은 20kW인 가열기와 높이 200mm에 물 냉각용 Freon/Water 냉각기가 연결되어 있다. 또한 2000mm 높이에는 바이패스관이 연결되었으며, 2600mm 높이에 각 시험부와 3개의 관으로 연결되어 있다. 하부에는 drain용 탭이 있으며 가열기의 200mm 상하에 열전대를 설치하였으며 상부에서 200mm 하단으로부터 400mm 간격으로, 수위계(OMEGA, LV-102 float type)가 설치되어있다.

### 펌프

380V 전압, 최대 110kW 전력이 공급되는 펌프는 3단으로 최대 3m<sup>3</sup>/min에 120m의 수두를 가지며 인버터와 바이패스관을 통한 유량으로 유량을 제어할 수 있다.

### 댐퍼 (Damper)

내경 200mm, 높이 2200mm인 탱크로 되어 있는 댐퍼는 펌프에 의해 발생하는 유동의 rattle을 최소화(유량의 0.5% 이하)으로 줄이기 위한 것이다. 내부에는 스크린으로 고정된 Wire mesh는 댐퍼 내의 수위의 요동을 줄이기 위한 것으로, 소선경 0.2mm인 SUS304 wire를 TD95%로 채워져 있다. 스크린은 두께 3mm인 SUS304 강판에 직경 5mm, 피치 10mm 구멍을 뚫어서 제작하였다. Wire mesh와 스크린을 합하여 높이는 320mm 이다. 수위는 1172mm에서부터 200mm 간격으로 설치된 두개의 수위계 사이에 유지되도록 하며 커버가스(질소)의 압력으로 이를 조절한다.

### 매니폴드 (Manifold)

매니폴드는 유량계 상류 및 하류에 각각 1개씩 설치되고, Manifold 1은 상류에 Manifold 2는 하류에 설치하였다. OMEGA 사의 구경이 3", 2.5", 1" 등 3가지의 터빈형 유량계를 설치하였으며 오차는 0.5%이다. 유량계의 유로 단면적은 주 배관의 직경보다 상대적으로 적어 이곳에서 압력강하가 많이 일어나므로 유입구의 직경을 유량계의 직경보다 크게 하였다. 매니폴드는 6" T자 형관을 용접으로 연결한 형태이다.

### 냉각기 (Freon/Water cooler)

냉각기는 펌프의 작동시에 발생하는 열을 어느 정도(20kW) 제거하고, 또한 작동 유체의 온도가 평형상태에 도달하는데 필요한 시간을 줄이기 위한 것이다. 최대유량에서 펌프로 인해 82.5kW 정도의 열이 발생될 것으로 예상되며, 대기와 유체의 온도차가 작은 경우에는 대기로의 열 방출이 적기 때문에 Freon을 냉매로 사용하는 열교환기를 채용하였다.

### 수평 시험부

이 시험부의 목적은 횡방향 유동 내 관다발과 유로가 이루는 경사도가 압력강하에 미치는 영향을 측정하기 위한 것이다. 전체 형상은 폭이 121.9mm, 높이가 203.2mm, 두께가 3mm인 5개의 직사각형 덕트이며 각각 유로와 관이 이루는 5개의 경사각( $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ )을 가진 관다발로 채워져 있다. 차압을 측정하기 위한 탭을 설치하였다. 각 관의 외경은 12.7mm이고 피치는 20.3mm인 정삼각 배열을 갖는다. 실험에서 유량범위는  $0.18\sim 1.8\text{m}^3/\text{min}$ 이다. 일정한 온도와 유량 조건에서 시험부 입구 중앙 그리고 출구에서의 압력강하를 측정한다. 또한 이 실험에서는 sight glass를 설치하여 레이저 속도측정기로 관다발 내부 국소유속을 측정한다. 이 시험부는 크게 3 부분으로 이루어진다. 즉, 확장관을 통과해 스크린을 지나는 1000mm 길이의 유입부(inlet section)와 길이가 1600mm인 관다발부(bundle section) 및 축소관을 지나는 길이 500mm인 유출부(outlet section)로 이루어져 있다.

유입부는 입구에 주 배관에서 직사각형 덕트로 완만하게 연결되는 길이 87.4mm의 확장관을 설치하였다. 직사각 덕트가 시작되는 곳에서 100mm 지점에서부터 5개의 스크린을 10mm 간격으로 설치하였다. 스크린은 두께 3mm인 강철판에 직경 10mm, 피치 15mm 구멍을 정삼각 배열로 뚫어 만들고, 덕트에 용접되어 있다. 유입부의 길이는 총 1000mm이다. 유입부와 유출부에는 들어오는 물의 온도를 측정하기 위한 탭을 설치하였다. 유출부는 유입부와 동일한 형태이나 사각 덕트 부분의 길이가 짧아 전체 길이는 500mm 이다.

길이 1600mm인 직사각 덕트로 양쪽에 직사각 플랜지가 붙어있는 형태이다. 전열관을 모의한 관은 물에 완전히 노출되는 등근 형상과 벽면에 부착되는 반쪽 형상의 두 가지가 있다. 반쪽 형상은 직경 12.7mm 봉을 반으로 쪼개어 제작하였다. 완전한 형태의 튜브의 개수는  $115(10\times 6 + 11\times 5)$ 이고, 반쪽 봉은 22개( $2\times 11$ )이다. 레이저 속도측정기를 사용하기 위하여 왼쪽 측면판의 정중앙에 유리창(sight glass)을 설치하였다. 오른쪽 측면판에는 유로와 같은 방향의 정 중앙선 상에 차압측정기용 4개의 1/8" 탭을 설치하였다.

차압계는 병렬로 설치할 수 있도록 지지대를 만들고, 각 압력 탭에서 차압계까지 스테인레스 관으로 연결하였다.

실험장치의 유동 루프를 제어하고, 각종 신호들을 수집하여 컴퓨터로 전송하기 위한 계측제어 장비를 제작하였다. 현재의 수평 시험 장치와 향후 계획된 수직 시험 장치를 포함하여 전체적으로 3개의 유량계, 11개의 차압계, 4개의 압력계, 8개의 가속도계, 4개의 수위계, 9개의 온도계 신호들을 수집 및 선택적으로 디스플레이 할 수 있도록 하였다. 그리고 1개의 전동 밸브 및 2개의 솔레노이드 밸브의 개폐를 제어할 수 있으며, 19개의 게이트 밸브 및 3개의 볼 밸브에 대한 개폐 상태를 디스플레이 할 수 있다. 가열기에 대해서는 일정한 온도로 유지될 수 있도록 제어하며, 작동시의 power를 디스플레이 할 수 있다. 펌프의 작동 및 인버터 제어를 위한 별도의 캐비닛을 설치하여, 신호의 수집 작업을 독립적으로 수행하도록 하였다.

### **데이터 수집(data acquisition)**

데이터 수집장비로는 HP3852A를 사용하였다. 횡방향 유동 내 관다발 실험에서 HP3852A로 입력되는 데이터는 수평 관다발 시험부 입구 및 출구에 위치하고 있는 2개의 thermocouple에서 입력되는 온도 신호, 수평 관다발 시험부에 위치한 3개의 차압측정기에서 입력되는 전류신호 및 3개의 유량계에서 입력되는 전압신호 등이다. 측정 유량의 범위에 따라 2개의 터빈형 유량계와 차압측정기를 교대로 사용하였다.

유량계로  $3\sim 9.2\text{ l/s}$ 에서는 OMEGA사의 Turbine meter(FTB110CE,  $Q_{\max} = 25\text{ l/s}$ )와 Signal

Conditioner(FLSC-28)를 사용하였고, 11~50 l/s에서는 OMEGA사의 Turbine meter(FTB111CE,  $Q_{max} = 41$  l/s)와 Signal Conditioner(FLSC-28)를 사용하였으며, 41 l/s가 초과한 유량범위에서는 두 개의 유량계를 동시에 사용하였다.

차압측정기로 Rosemount사의 10inH<sub>2</sub>O(1151D83E22B1)와 100inH<sub>2</sub>O(1151P4S22M1B304)를 사용하였다. 모든 측정신호는 Data Acquisition Unit(HP 3852A)로 읽어 들여 개인용 컴퓨터에 저장한다. 측정 Data 개수는 매 초당 200개 씩 읽어 들여 바로 통계 처리하도록 하였다.

### 유량계 및 차압계 보정

유량계의 보정은 유량이 주파수로 대응되어있는 제조사에서 제공한 보정표를 사용하였으며 이에 따라 각 주파수를 0~5V의 전압에 대응시켜 사용하였다. 25 l/s와 41 l/s 유량계의 전체 오차는  $\pm 0.5\%$ 이고, 보정곡선 표준편차는 각각 0.1%, 0.003%이다. 차압계는 Omega사의 압력 보정계(PCL-200)를 이용하여 알고있는 압력에 대하여 2~10V의 전압으로 나타내었다. 이때 10 in H<sub>2</sub>O와 100 in H<sub>2</sub>O 차압계의 전체 오차는  $\pm 0.5\%$ 이고, 보정식 표준편차는 각각 0.04%, 0.02%이다. 본 실험에 사용된 차압측정기 및 유량계에 대한 보정곡선은 Fig.2 와 Fig.3에 도시되어 있다.

### **3. 실험결과 및 토의**

본 논문에서는 판다발 실험에 대한 결과로 판다발이 정사각형 덕트내에 위치하고, 유동방향과 판다발 사이의 각도가 다른 5개의 시험부(90°, 75°, 60°, 45°, 30°)에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 설정된 유량은 유량계의 용량에 따라 0.97~41 l/sec 의 범위에서 약 30개의 구간을 log-scale로 나누어 실험을 수행하였으며, 이 유량은 관 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수로 환산하면 약 3000-40000의 범위에 해당된다. 유량의 크기에 따라 유량계를 바꾸어 가며 실험을 수행하였으며, 유량계가 바뀌어지는 구간에서는 각 구간이 중첩되도록 하였다. 유량의 크기에 따라 차압측정기의 측정 한도도 변하므로 약 9.2 l/sec 유량의 크기에서 용량이 다른 차압측정기를 교체하여 가며 실험을 수행하였다.

Fig.4는 본 연구에서 수행된 실험결과의 일부를 보여주고 있다. 측정된 압력강하의 값은 입구에서의 관 사이를 지나는 속도의 값으로 무차원화하였고, 레이놀즈 수는 이 속도의 값과 관 직경으로 정의하였다. 모든 유체의 밀도와 점성도는 시험부의 입구와 출구에서의 온도의 중간값으로 계산하였다. Fig.4에서 보는바와 같이 무차원화된 압력강하의 값은 레이놀즈 수에 대하여 음수의 자승으로 변화하였으며, 유동방향과 튜브와의 각도가 증가할수록 무차원화된 압력강하의 값이 증가하였다. 또한 유동방향과 튜브와의 각도와 관계없이 log-plot에서 기울기가 거의 동일함을 관찰할 수 있어, 유동방향과 튜브와의 각도와 관계없이 압력강하에 대한 상관식의 레이놀즈 수의 자승값(power)이 동일함을 유추할 수 있다.

앞으로 판다발에 대한 횡방향 유동에 대한 실험을 좀더 상세하게 측정하고, 이들 데이터를 기준으로 각도에 따른 압력강하 상관식을 개발하고자 한다. 또한 판다발에 대한 축방향 유동에 대한 실험을 수행하고, 관련 상관관계식을 개발할 계획이다.

### **참고문헌**

1. Omohundro, G.A., Bergelin, O.P. and Colburn, A.P., "Heat Transfer and Fluid Friction

- during Viscous Flow across Banks of Tubes," 1949, Trans. of the ASME, Vol.71, pp.27-34.
2. Bergelin, O.P., Davis, E.S. and Hull, H.L., "A Study of Three Arrangements in Unbaffled Tubular Heat Exchangers," 1949, Trans. of the ASME, Vol.71, pp.369-374.
  3. Bergelin, O.P., Brown, G.A. Hull, H.L. and Sullivan, F.W., "Heat Transfer and Fluid Friction During Viscous Flow across Banks of Tubes, Part III" 1950, Trans. of the ASME, Vol.72, pp.881-888.
  4. Bergelin, O.P., Brown, G.A. and Doverstein, S.C., "Heat Transfer and Fluid Friction During Viscous Flow across Banks of Tubes, Part IV" 1952, Trans. of the ASME, Vol.72, pp.881-888.
  5. Jones, C.E. and Monroe, E.S., "Convective Heat Transfer and Pressure-drop of Air Flowing across in-line tube Banks, Part I," 1958, Trans. of the ASME, Vol.80, pp.18-24.
  6. Gram, A.J., Mackey, C.C. and Monroe, E.S., "Convective Heat Transfer and Pressure-drop of Air Flowing across in-line tube Banks, Part II," 1958, Trans. of the ASME, Vol.80, pp.25-35.
  7. Hammeke, K., Heinecke, E. and Scholz, F., "Heat-transfer and Pressure-drop Measurements in Smooth Tube Bundles with Transverse Flow, Especially at High Reynolds Numbers," 1967, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.10, pp.427-446.
  8. Achenbach, E., "Distribution of Local Pressure and Skin Friction around a Circular Cylinder in Cross-flow up to  $Re=5\times 10^6$ ," 1968, J.F.M., Vol.34, pp.625-639.
  9. Neal, S.B.H.C. and Hitchcock, J.A., "Heat Transfer and Gas Flow Processes within a Bank of Close Pitched Plain Tubes in Cross-flow," 1967, C.E.R.L. Note No.RD/L/N9/67.
  10. A. Zukauskas, "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow," 1972, Advances in Heat Transfer 8, 93-160.
  11. S. Umeda, W.-J, Yang, "Interaction of von Karman Vortices and Intersecting Main Streams in Staggered Tube Bundles," 1999, Experiments in Fluids 26, 389-396.
  12. Kazakevich, F.P., "Influence of the Angle of Approach of a Gas Stream on the Aerodynamic Resistance of a Tube Bundles," 1952, Izv. Vses. Teplotekh. Inst. Imeni. F.E. Dzerzhinskogo, No.8.
  13. Kirsch, D. and Schleisiek K., "Flow and Temperature Distributions around Local Coolant Blockages in Sodium-cooled Fuel Subassemblies," 1973, Progress in Heat and Mass Transfer, Vol.7, pp.239-249.
  14. Lokshin, V.A., Mochan, S.I. and Fomina, V.A., "Generalization of the Aerodynamic Resistance of Tube Bundles in a Transverse Flow," 1971, Teploenergetika, No.10, 41-48.
  15. 이계복, 이병진, "완전히 발달된 맨봉주위의 난류 유동장에서 난류 응력사이의 상관 관계에 대한 연구," 1995, 한국원자력학회지, Vol. 27, p 888.
  16. H. J. Chung, S. Cho, S. Y. Chun, S. K. Yang, and M. K. Chung, "Turbulent Flow in an Axially Finned Rod Bundle with Spacer Grids", 1999, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 30, p 328.

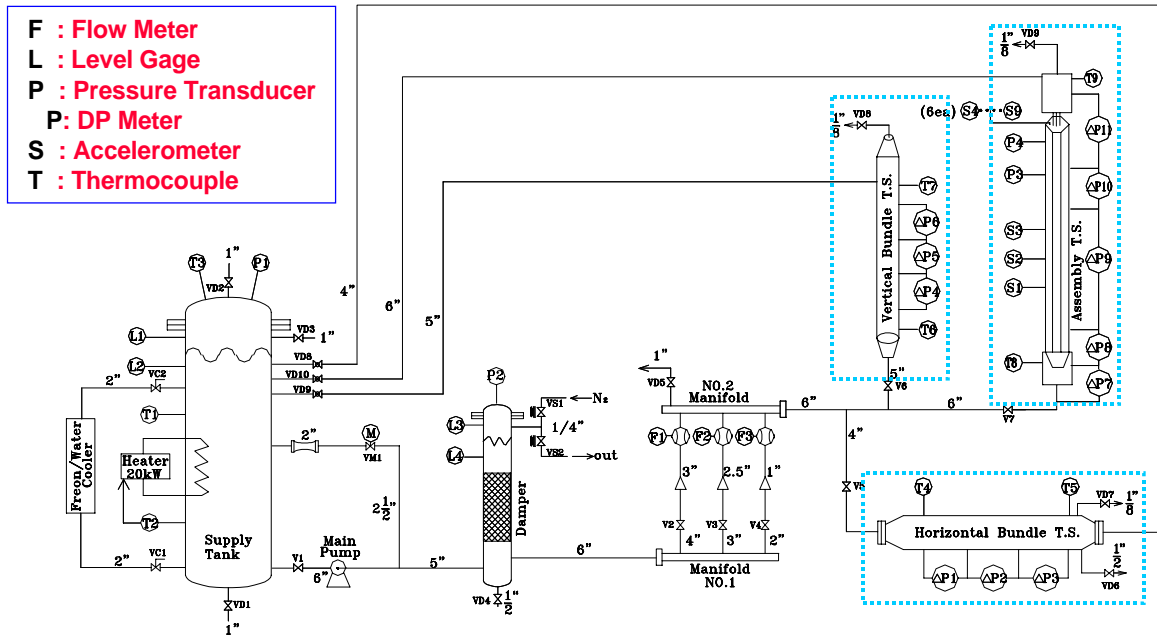
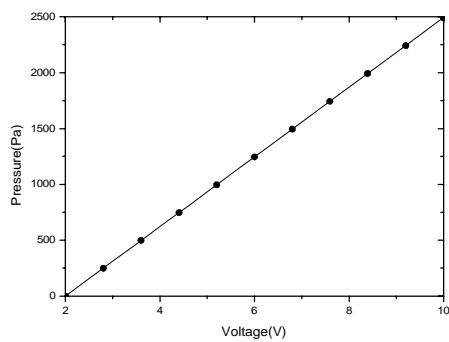
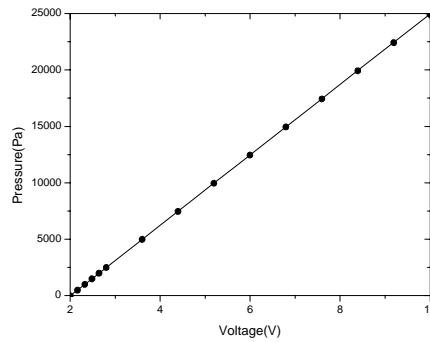


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Facilities.

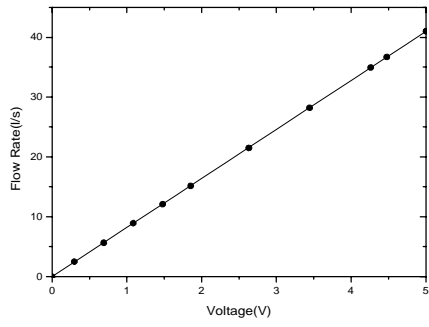


a) DP Meter1 (10inH<sub>2</sub>O)

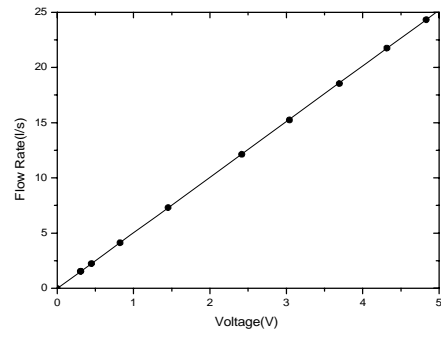


b) DP Meter2(100inH<sub>2</sub>O)

Fig.2 DP Meters Calibration Curves

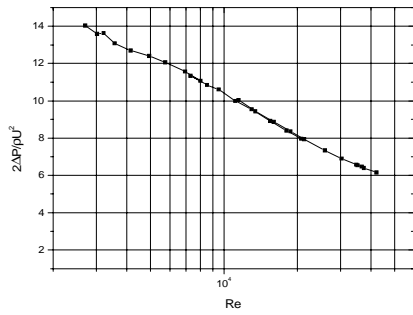


a) Flow Meter1(40 l/s)

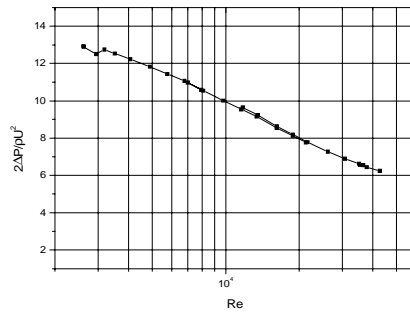


b) Flow Meter2(25 l/s)

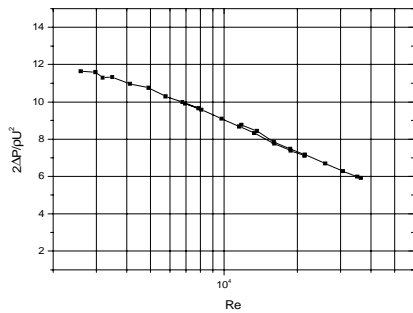
Fig.3 Flow Meters Calibration Curves



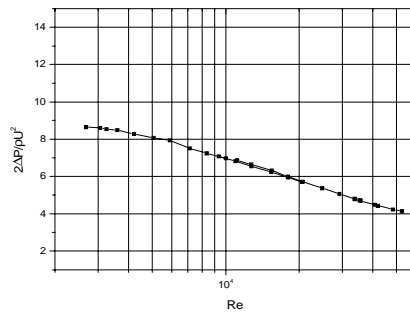
a)  $\alpha = 90^\circ$



b)  $\alpha = 75^\circ$

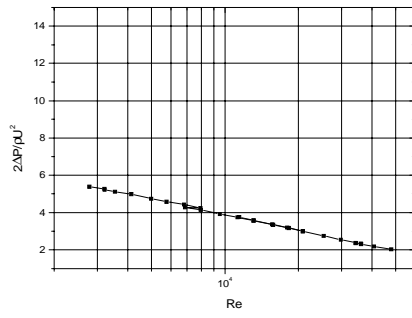


c)  $\alpha = 60^\circ$



d)  $\alpha = 45^\circ$





e)  $\alpha = 30^\circ$

Fig.4 Variation of Dimensionless Pressure Drop for Five Different Inclined Tubes