

경사진 입구를 갖는 급확대관내의 난류유동과 열전달특성에 관한 실험적연구

권기린*, 한진규**

An Experimental Study on the Turbulent Flow and Heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion with Inclined Inlet Pipe

Ki Rin Kwon*, Jin Gyu Han**

ABSTRACT

Experiments were carried out for the turbulent flow and heat transfer downstream of an 10° - inclined concentric expansion in a circular pipe with a constant wall heat flux.

The uniform heat flux condition was imposed to the downstream of an inclined expansion by using an electrically heated pipe and the flow upstream of the expansion was unheated and fully developed.

Runs were made with small diameter to large diameter ratio of 0.33 and over the Reynolds numbers range of 60,000, 90,000 and 120,000 (based on upstream diameter). Experiments were tested with air as working fluid.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) Fully development region showed from $x/d=22$ to downstream in an 10° - inclined concentric expansion turbulent flow through the test tube.
- 2) Friction factors of the test tube showed a maximum value at $x/d=15$.
- 3) For all Reynolds number, the wall temperature showed a curve of parabolic variation at $16 < x/d < 48$, and the bulk temperature showed a linear distribution of increase at $9 < x/d < 48$.
- 4) The location of the maximum Nu/Nu_{DB} showed at the point of 16 step-heights for $Re=60,000, 90,000$ and $120,000$ of an 10° - inclined concentric expansion.

*기계공학과,

**기계공학과 대학원

Nomenclature

d : upstream tube diameter (mm)	C_p : specific heat at constant pressure (KJ/kg °C)
D : downstream tube diameter (mm)	P_t : total pressure (kg/m ²)
f : friction factor	P_a : velocity pressure (kg/m ²)
H : step height, $H = (D-d)/2$	P_s : static pressure (kg/m ²)
h : heat transfer coefficient (W/m ² °C)	T_w : wall temperature (°C)
k : thermal conductivity of air (W/m °C)	T_b : bulk temperature (°C)
R : radius of the downstream tube (mm)	Re : Reynolds number in upstream tube
r : radial local distance from downstream bottom wall (mm)	N_u : Nusselt number
x : axial distance from expansion face (mm)	Pr : Prandtl number
u : local velocity (m/s)	dp : pressure gradient (N/m ²)
\bar{u} : mean axial velocity in upstream tube (m/s)	dx : axial distance between the measuring stations (m)
\dot{m} : local mass flow rate (kg/s)	Nu_{DB} : Nusselt number determined by Dittus-Boelter eq.
ρ : air density at actual condition (kg/m ³)	

서 론

원관내의 급팽창을 통한 난류 유동에서 분리되고 재부착된 영역에 대한 열전달 효율은 시험관의 입구조건에 의하여 일어나는 박리 및 재부착현상으로 인한 난류운동에너지의 증가로 하류쪽의 완전히 발달된 유동에 비해 관내 팽창면의 입구영역, 특히 재부착 영역부근에서 더 큰 효율을 나타낸다고 알려져 있다(Baughn et. al, 1984 ; Dellenback et. al, 1987).

그리고, 1948년 Boelter 등의 연구에 의한 steam jacket으로 유지한 균일온조조건하의 실험에서 재부착점의 최대 열전달계수는 완전히 발달된 유동에서의 열전달효율에 비해 약 4배로 나타남을 보고 하였다.

그 이후, 원관내에서의 난류 열전달에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 에너지파동이후

자원의 효율적 이용에 관한 관심이 날로 높아지면서 유동관로 입구에 선회기 설치 등의 입구조건변경, 레이놀드수의 변경등의 연구를 통하여 열전달효율의 향상을 꾀하고 있으며(Habib et. al, 1982), 근래에 환경문제와 더불어 연소시스템에서 열전달 및 유체의 거동에 의한 열효율 및 배기가스의 오염물질 발생에도 관심이 고조되고 있고 열교환기 등에서 급팽창의 효과와 마찬가지로 열전달계수를 크게 증가시킬수 있다는 점 때문에 이분야에 대한 연구가 계속되어 오고 있다.

최근에는 급팽창에 대한 원관내 난류열전달유동에 대한 수치해석적 방법을 이용하여 이전의 실험적 연구결과와 비교 검토하는 사례가 많아지고 있다(이 등, 1992 ; Nakanishi et. al, 1992 ; Zemanick et. al, 1970).

그러나, 이러한 실험에서의 입구조건이나 유동조건의 변경에 따른 연구·분석이 많았음에도 불구하고

하고 급팽창관에서의 열전달은 그 형상의 급변화에 의한 유동의 불안정, 팽창면 구석부근에서의 불안정한 eddy현상, 재순환유동의 형성으로 인한 난류전단층의 발생 등 그에 따르는 유동구조가 아주 복잡하고 난해한 관계로 열전달메카니즘에 관한 상세한 해석은 아직도 명확히 이루어지고 있지 않다.

이러한 상황에서, 급팽창면에서 부터 완전히 발달된 유동영역에 이르기까지의 박리와 재부착유동 및 corner eddy현상을 좀 더 파악하고, 유체의 분사각, 분류경계면, 난류의 구조 및 속도구배, 균일한 열플럭스를 주었을 때의 열전달효과등의 특성에 대한 이해를 위하여 많은 연구를 필요로 하고 있으며 각종 열전달기기의 설계에 있어서의 고효율화 및 연소기기에서 유동공기의 입구조전 등에 따르는 연소현상의 해석 등에서도 많은 연구·분석자료가 요구되고 있다.

따라서, 본 실험에서는 레이놀드수를 60,000과 90,000 및 120,000으로 설정하였고 upstream

tube의 입사각을 10도 경사지게 하였으며 팽창면 입구의 팽창비를 0.33으로 하여, 경사진 급팽창에서의 난류유동의 축방향 속도성분 및 거동을 관찰하고 이 유동장에 균일한 열플럭스를 형성했을 때의 열전달현상 등을 파악·고찰하였다.

유동 구조

1. 개요

일반적인 축대칭의 급팽창유동에서 발견된 전체적인 특징을 Fig. 1에 나타내고 있다.

유동구조는 다소 복잡하며, 팽창면 가까이에서 자유전단층의 특성들과 더 나아가 재부착의 downstream에서의 벽경계층의 특성들로 구성되어 있다.

Simpson (1981)은 급팽창에서의 유동장을 기술적으로 두 영역, 즉 박리와 재발달로서 표현해 왔

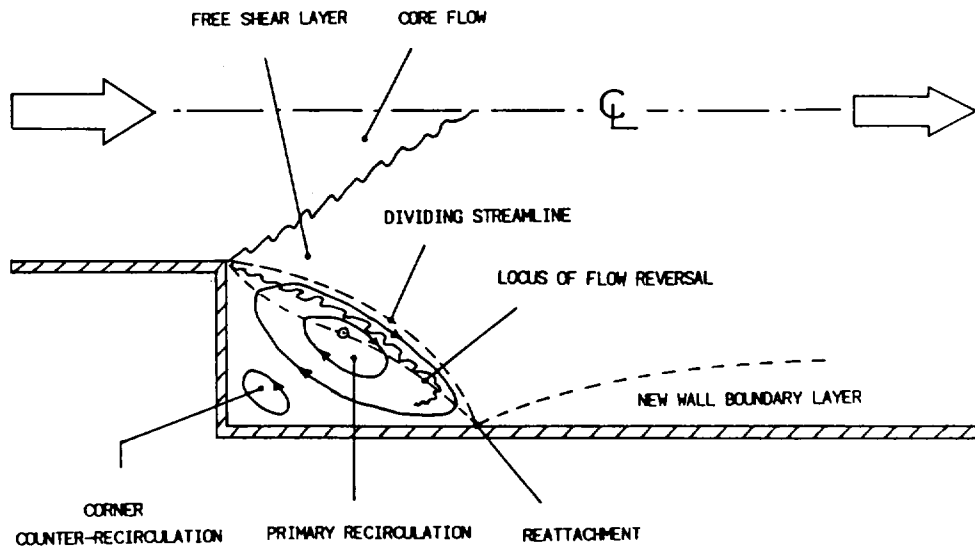


Fig. 1 Flow features in an abrupt pipe expansion

다. 박리는 분리(입구관벽을 떠나는 유동)를 포함하는 전 과정, 즉 재순환, 자유전단층의 성장, 그리고 보다 큰 관벽(downstream tube)에의 재부착을 내포한다.

반대로, 재발달영역은관이 길어 유동이 충분히 발달된 곳에서 가상경계층의 특성을 갖는다. 그러나 재발달영역의 초기부분은 발달하는 관유동에서의 통상적인 입구영역과는 다소 다르다.

2. 박리 구역(Separation region)

급팽창에서의 유동은 원형분사의 형태로 확대관에 들어가고, 분리는 벽경계층을 복잡한 자유전단층으로 바꾼다.

난류유동의 경우에, 팽창근처에서의 유동장은 3차원 와류운동이 계속되는 대규모 난류구조 특성에 지배된다. 이 운동들은 벽압력에서의 초기압력강화에 원인이 있다고 본다(Sultanian, 1984).

3. 재순환(Recirculation)

팽창말단에서 발산하는 전단층은 분사로 core flow를 덮으며, 관중심을 향하여 내부로, 관벽쪽을 향하여 외부로 모두 다 증대된다. 전단층의 내부로의 성장이 core flow의 희생으로 발생하는 반면에 외부로의 성장은 전단층이 결국 관벽에 부착할 때까지 entrainment process를 통해서 지속된다.

Entrained fluid는 알맞은 부(-)의 압력구배를 통하여 downstream으로 계속해서 채워진다. 이와 같이, Entrained fluid의 forward branch에서의 유동은 증상의 제트운동량에 의해서, 그리고 reverse branch는 역압력구배(adverse pressure gradient)로 구동되어지는 1차 재순환영역에 인접하는 counter-recirculating eddy(역방향 재

순환)의 존재를 암시한다.

Stevenson(1983)은 팽창관의 half-step 이내에서 적어도 하나의 corner eddy가 나타남을 확인했다.

4. 재부착(Reattachment)

재부착 영역은 근본적으로 상당히 복잡하며, 관벽에 가까운 전단층은 본질적으로 재부착점에서 갈라진다. 그리고, 그곳에서 유동의 일부가 upstream방향인 재순환 영역 속으로 편향된다.

Downstream방향으로 계속해서 남아있는 부분은 난류구조에서 큰 변화를 받는데, 재부착영역에서 둘로 나누어지는 큰 와류들에 기인한다.

Johnston(1987)은 표면에 아주 가까운 부분의 순간속도가 그 시간의 back flow가 50% 및 forward flow가 50%라는 구조적 위치와 같은 어떤 2차원 재부착점을 정의했다.

보편적인 유동형태를 고려하면, 재부착점은 벽근처에서 평균속도가 "0"이고 평균전단응력이 "0"인 지점이라 판단하고 있다.

실험장치 및 방법

1. 실험장치

Fig. 3은 열전달특성을 실험하기 위해 만들어진 장치의 전체적인 개략도를 나타내었다.

이 장치는 가변 회전수 기능을 갖고 있는 송풍기와 test tube로 구분할 수 있으며, 이를 세분하여 설명하면 다음과 같다.

유체거동실험에 사용된 upstream tube는 내경이 50mm, 길이가 1,000mm인 투명 아크릴 관을 사용하여 downstream tube의 입구에 수직방향으로 약 10도 경사를 주어 upstream tube의 중심과

downstream tube의 중심이 일치한 상태에서 하향입사되도록 설치하였으며(Fig. 3의 ①), downstream tube는 내경이 150mm, 두께가 5mm, 길이가 2,200mm인 투명 아크릴 관을 사용하였고, 관내의 압력과 유속을 측정하기 위해서 측면에는 $\phi 7\text{mm} \times L30\text{mm}$ 의 동관을 설치하였으며, 상부에는 유속측정용 피토우 튜브를 설치하기 위한 측정용 구멍을 가공하였다.

또한, test tube와 송풍기 사이에는 downstream tube내의 평균유속을 측정하기 위하여 강관(steel pipe)으로 연장하여 멀티피토우 튜브를 설치하였다(Fig. 3의 ⑧).

그리고, upstream tube에 측정공을 가공하여 멀티피토우 튜브를 설치함으로써 평균유속을 구하여 레이놀드수를 결정하였다.

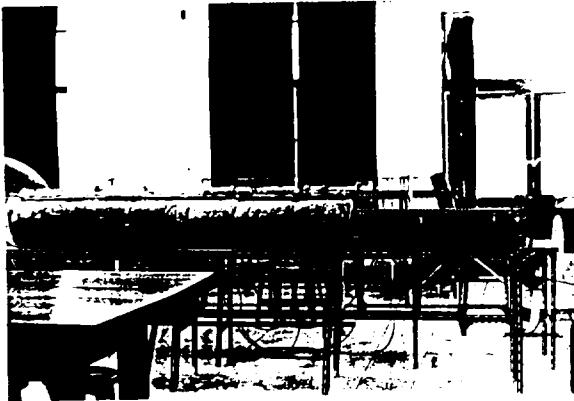


Fig. 2 Photograph of the test tube mounted with heating coil

여기에서, 실험자료의 중요 요소인 레이놀드수를 구하는 방법으로 원심적 가변속도 송풍기의 회전수를 변경·조절했으며, 이때의 일정한 레이놀드수에서 측정된 동압을 계산처리하여 속도성분등을 산출하는 기본요소로 활용하였다.

열전달실험을 위해서는 유체거동실험에 사용된 test tube와 내경이 같고, 두께가 5mm, 길이가 3,000mm인 동관을 사용하여 downstream tube를 제작하였으며, test tube의 내부에 흐르는 유체의 온도를 측정하기 위하여 상부에 각 구간마다 구멍을 뚫어 $\phi 7\text{mm} \times L30\text{mm}$ 인 동관을 설치하여 보강한 후 열전대를 삽입하였다.

그리고, test tube의 관벽 온도를 측정하기 90도 각도로 K type 열전대를 설치하였으며 Fig. 5에 측방향의 각 구간별 설치위치를 보여주고 있다.

또한, 이 열전달 test tube에 균일가열(uniform heating)을 유지하기 위하여 heating coil ($\phi 2.5\text{mm}$)을 17.5mm의 동일한 간격으로 감았으며, 가열코일로 부터 발열되는 열량이 외부로 손실되는 것을 막기 위하여 시험관의 외부를 유리섬유 단열재로 감았다(Fig. 2).

위에 기술한 실험장치와 가변속도 송풍기를 flexible connector로 연결하여 실내공기를 흡입 시킴으로서 공기의 유동장을 만들 수 있었다.

다음의 수치와 그림은 유체실험 및 열전달실험을 위하여 아크릴 튜브와 동관에 설치한 측정위치 및 거리와 갯수를 나타낸다.

Fig. 4.와 5에 표시한 번호는 아래와 같은 치수를 나타낸다.

① 팽창면으로 부터의 측방향 거리(x , mm) : 압력(속도)과 온도를 측정하기 위하여 시험관에서 설치한 측정공의 위치를 나타내며, 관마찰계수를 구하는 데에서 측정점간의 거리 산출의 기준이 된다.

② 측정 위치(x/d) : 팽창면에서 측정위치까지의 거리를 upstream tube의 내경으로 나눈 값으로 관마찰계수 및 속도와 열전달계수등의 실험결과를 나타내는 데 필요로 하는 무차원수이다.

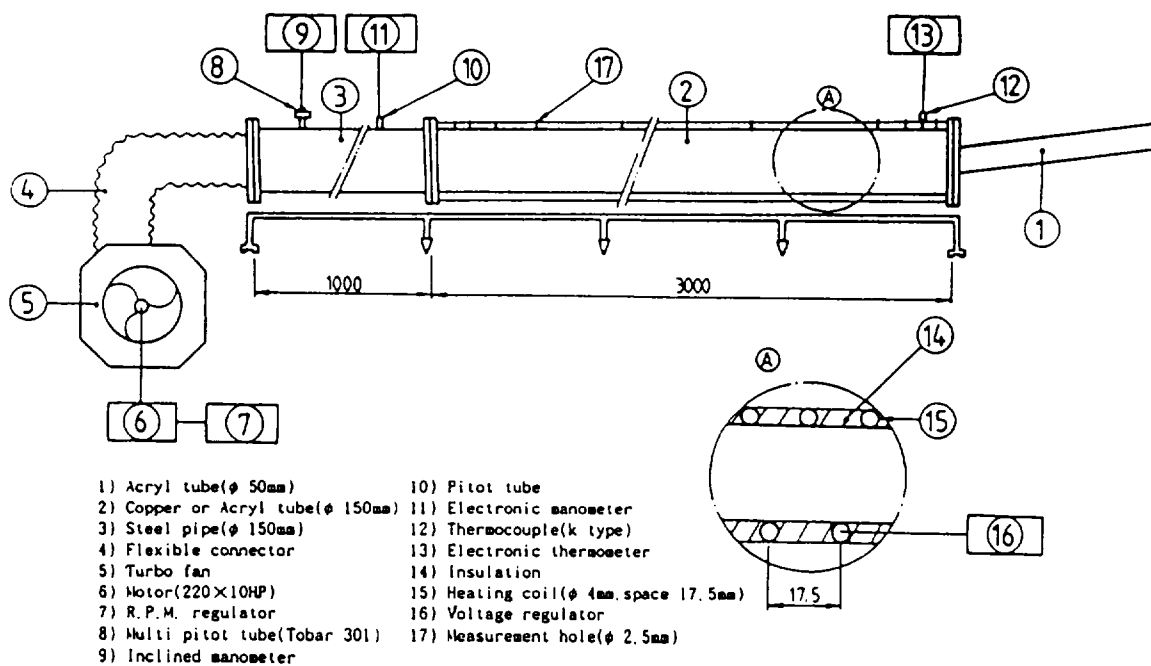


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

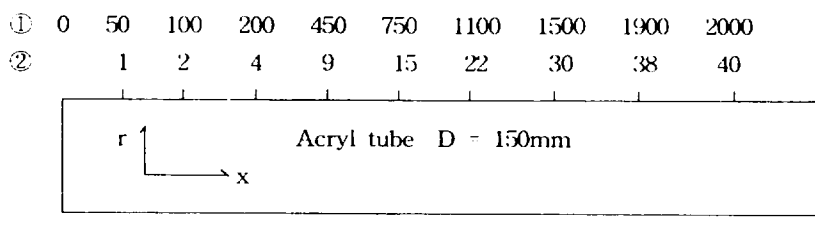


Fig. 4 Velocity measurement positions of downstream tube

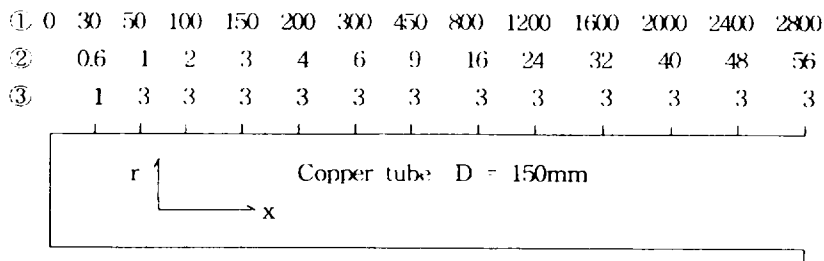


Fig. 5 Temperature measurement positions for heat transfer experiment

③ 열전대의 수 : 각 위치에 설치한 열전대의 수를 나타내며, 동일 원주상에 90도의 각도로 설치하였다.

2. 실험 방법

2.1 유속측정

아크릴 튜브로 제작된 test tube의 측정공에 설치한 scale이 부착된 측정기의 멀티피토우 튜브를 미압계(micro manometer)에 연결하고 송풍기를 가동시켜 유동장내의 유동공기가 일정한 상태로 안정된 후에 upstream tube에서 원주방향에 국소유속을 측정하여 유동공기의 평균속도를 구하고, 이로부터 레이놀드수를 구하였다.

그리고, downstream tube에 $x/d=1$ 에서 $x/d=40$ 까지 설치된 각 측정공에 순서대로 측정기를 설치하여 피토우 튜브를 하부관벽으로부터 유동장의 중심부를 통과하여 상부관벽에 이르기까지 5mm 간격으로 이동시키면서 모든 지정점의 압력을 측정하였다.

이 때의 측정된 동압을 식(1)에 적용하여 유속을 구하였다.

$$u = C\sqrt{P_a} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(단, $P_t = P_a + P_s$)

위와 같은 방법으로 레이놀드수가 60,000 및 90,000과 120,000인 송풍기의 회전수를 각각 고정시켜 측정하였으며, 측정시 미세한 압력의 오차를 줄이기 위하여 전압 및 정압 측정공을 모두 막아 유동장이외의 흐름을 모두 차단했다.

2.2 관마찰계수 측정

각 레이놀드수에 따른 송풍기의 회전수를 조절한 후, test tube내의 유동상태가 일정한 상태로 안정된 다음 유속 측정시의 방법과 동일하게 down-

stream tube의 모든 측정점에서 압력손실을 micro manometer로 측정하여 다음 식(2)에 적용하여 관마찰계수를 구하였다.

$$f = \frac{-(dp/dx) \cdot D}{1/2 \cdot \rho \cdot U^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

2.3 체적온도와 관벽온도의 측정 및 열전달계수 전향에서의 같은 방법으로 송풍기를 가동시켜 회전수를 조정함으로써 레이놀드수를 결정한 다음, downstream tube의 외벽에 감겨 있는 heating coil에 AC 전원 (AC 220V, 7.5A)을 공급하여 열플럭스가 일정한 상태로 되도록 하였다.

그런 다음, 각 측정 위치에 열전대를 삽입하여 하부관벽으로부터 관중심을 통과하여 상부관벽에 이르기까지 각각 정해진 간격(관벽으로부터 1mm, 2mm 이후에는 5mm 간격)으로 시험관 내부에서 흐르는 유체의 온도를 측정하여 이로부터 체적온도를 계산하였으며, 이 온도들을 식(3)에 적용시켜 국소 열유속을 구하였다.

또한, 관벽온도는 test tube의 외벽에 포설된 열전대로부터 전자온도계를 이용하여 측정하였고, 여기에서 얻어진 체적온도(T_b)와 관벽온도(T_w)를 식(4)에 대입하여 열유속을 구하였으며, 두 측정점간의 열전달계수는 식(5)를 이용하여 구하였다.

$$dq = \dot{m} \cdot C_p \cdot dT_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q = h \cdot (2\pi r) \cdot dx \cdot (T_w - T_b)_{mean} \quad \dots (4)$$

$$h = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot dT_b}{2\pi r \cdot dx \cdot (T_w - T_b)_{mean}} \quad \dots\dots (5)$$

그리고, 이 대류열전달계수(h)와 체적온도(T_b)에 따르는 열전도율(k)을 찾아 식(6)을 사용하여 Nusselt수를 구하였다.

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} \quad \dots\dots\dots (6)$$

한편, 관내에 매끄러운 유동장에서 유동이 완전

발달되었을 때의 적용식인 Dittus-Boelter의 방정식을 이용하여 Nu_{DB} 를 산출하였다.

$$Nu_{DB} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots\dots (7)$$

실험결과 및 고찰

1. 축방향 속도분포

Fig. 6, 7, 8은 팽창면에서의 공기의 유동을 경사지게 분사시킨 상태에서 측정된 축방향 속도분포를 upstream tube에서의 평균속도로 나누어 무차원화한 결과를 도시한 것으로서 횡축의 r/R 이 0인 위치는 하부관벽, 1인 위치는 유동장의 중심, 2인 위치는 유동장의 상부관벽을 나타낸다.

그림에 나타난 것과 같이, 각각의 레이놀드수에

서 r/R 에 속도구배는 약간의 차이는 있지만 거의 유사한 속도구배를 보임으로 해서 Re 수의 변동이 유동구조의 양상에는 큰 영향을 주고 있지 않음을 알 수 있다.

그리고, 축방향의 측정지점인 각각의 x/d 에서의 속도분포를 보면, $x/d=1$ 일 때 r/R 인 1인 지점을 중심으로 넓은 범위에 걸쳐 높은 속도를 보이며 하부관벽으로부터 0.6인 지점에서 급격하게 속도가 떨어져 거의 관벽에 도달할 때까지 큰 부(-)의 속도를 보이고 있다. 이를 근거로 이 지역에서 1차 재순환영역이 강하게 존재하고 있음을 알 수 있다. 반면, 상부관벽에서는 $r/R=1.4$ 정도를 기점으로 해서 0의 속도를 나타내며 거의 정체된 상태를 보인다.

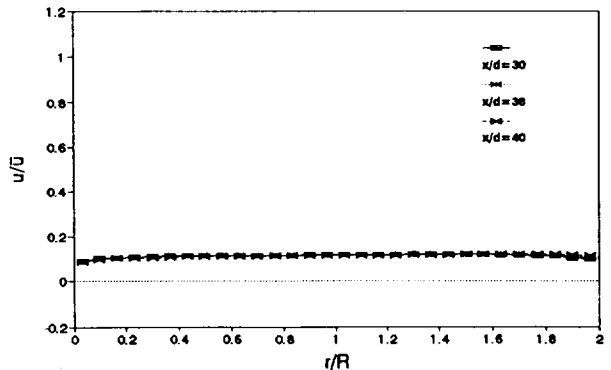
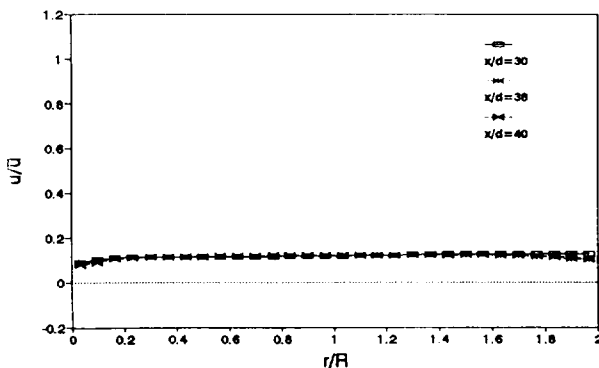
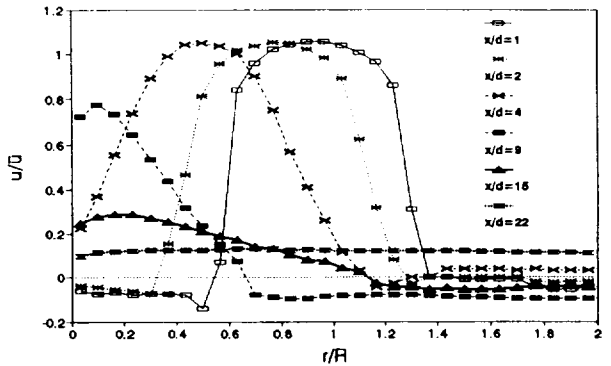
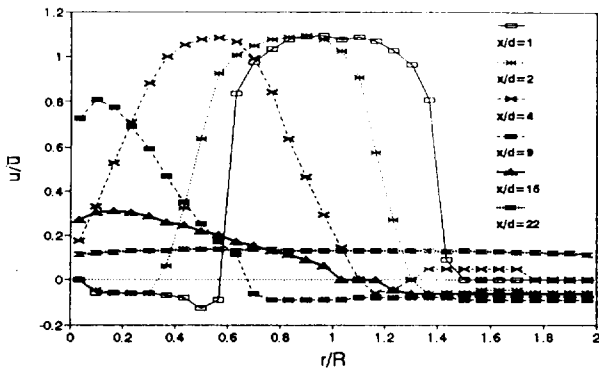


Fig. 6 Axial velocity profiles for $Re=60,000$ with an inclined concentric expansion

Fig. 7 Axial velocity profiles for $Re=90,000$ with an inclined concentric expansion

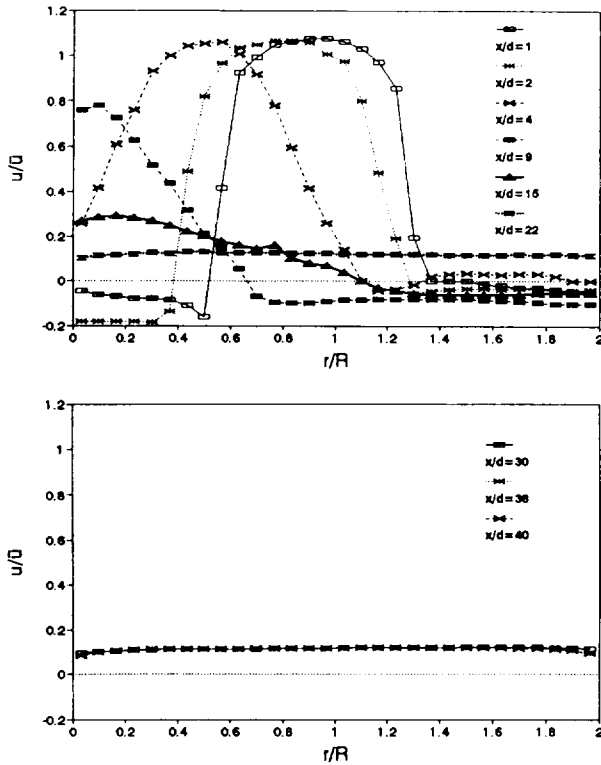


Fig. 8 Axial velocity profiles for $Re=120,000$ with an inclined concentric expansion

x/d 가 2에서 부터 9까지 팽창면에서부터 축방향으로 멀어짐에 따라 속도분포곡선의 선단이 하부관벽쪽으로 이동함과 최고속도 부분이 좁아짐을 근거로 볼 때 $x/d=9$ 이고 $r/R=0.1$ 인 지점을 끝으로 해서 core flow가 형성되었음을 알 수 있다.

그리고, 하부관벽에서는 $x/d=2$ 인 지점까지 재순환이 나타나고 있는 반면, 상부관벽측에서는 $x/d=15$ 인 지점까지 재순환구역이 넓은 범위에 걸쳐 퍼져있다. 한편, 유동장 전체적으로 볼 때 x/d 가 15인 지점부터 서서히 재 발달하기 시작하여 $x/d=22$ 인 지점에서 downstream쪽으로 완전발달영역을 보이고 있다.

이전에 연구된 평행입사의 경우는 약 $x/d=9$ 인

지점부터 완전발달영역을 보이고 있으나 본 실험 장치의 경사입사에서는 상부관벽측에서 재순환 및 재부착이 팽창면에서 먼 거리까지 형성됨으로 해서 약 22인 지점부터 완전발달영역이 나타나고 있다.

Fig. 9, 10, 11은 축방향지점에서 각각의 r/R 에 대한 속도르 표시하여 하부관벽에서 상부관벽까지의 속도분포를 비교할 수 있도록 parameter를 변경하여 도시하였다.

그림에서와 같이 팽창면 부근에는 급격하고 불안정한 난류유동을 보이고 있고, 하부관벽측에서는 $x/d=9$ 인 지점까지 역류현상이 나타나며, 상부관벽에서는 $x/d=22$ 에서 부터 각각의 레이놀드수에 대하여 거의 유사하게 완전발달된 유동구조를 보이고 있다. 이 자료들을 분석하여 유동장의 하부에서는 $2 \leq \text{step height} \leq 4$ 에서, 상부에서는 $15 \leq \text{step height} < 22$ 에서 재 부착됨을 알 수 있었다.

Fig. 12는 유체거동실험의 설치된 측정공에서 얻어진 속도성분을 기준으로 하여 도시한 2차원 유동구조로서 팽창면에서 부터 입구영역의 개략적인 구조를 나타내었다.

2. 관마찰계수

마찰계수는 유체가 관내를 흐를 때 관벽에서의 마찰에 의한 손실을 가져와 유체수송 에너지를 증가시키는 원인이 된다. 이러한 이유로 해서 마찰계수는 유동장의 중요한 변수로 작용한다.

마찰계수는 레이놀드수에만 의존하는 것이 아니라 관퍼면조건에 의하여 큰 영향을 받으며, 매끄러운 표면에서는 최소값을 보이고 관내부의 표면 거칠기가 증가할수록 더불어 증가한다.

레이놀드수를 60,000과 90,000 및 120,000으로 하고 경사팽창시켰을 때의 본 실험에서 측정된 관마찰계수의 값을 Fig. 13에 나타내었다.

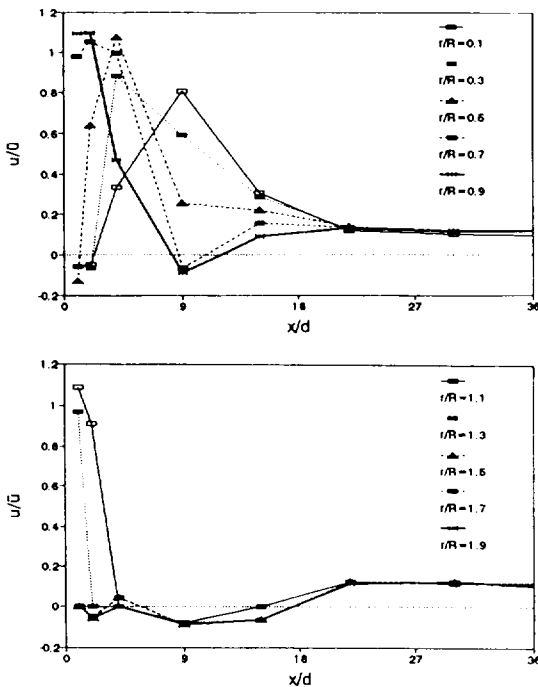


Fig. 9 Streamlines and steady flow from r/R 0.1 to 1.9 for $Re=60,000$ with an inclined concentric expansion

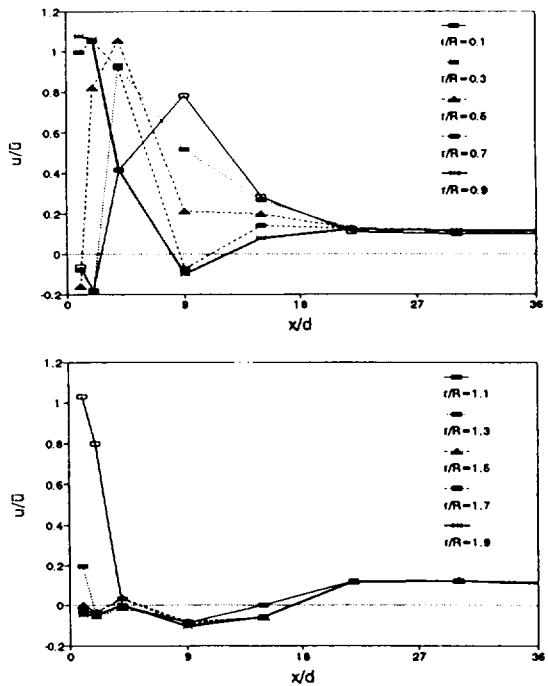


Fig. 11 Streamlines and steady flow from r/R 0.1 to 1.9 for $Re=120,000$ with an inclined concentric expansion

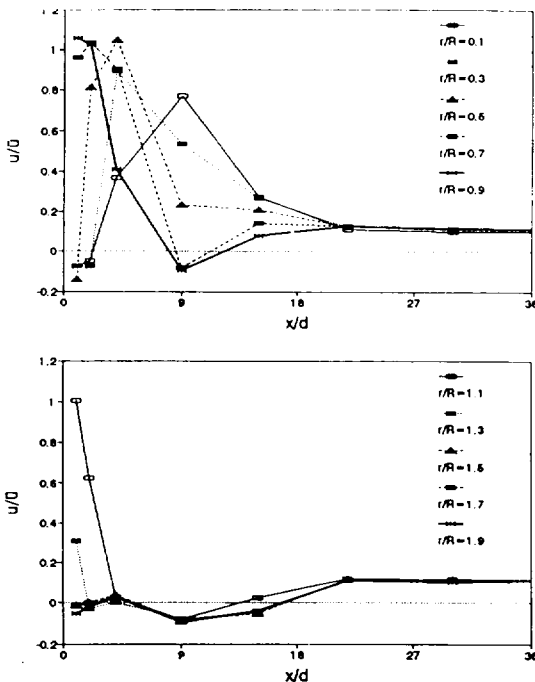


Fig. 10 Streamlines and steady flow from r/R 0.1 to 1.9 for $Re=90,000$ with an inclined concentric expansion

그림에서 보는 바와 같이, 팽창면으로부터 각각의 측정점에서 레이놀드수가 증가함에 따라 마찰계수는 높은 값을 보이고 있으며, $x/d=22$ 인 지점에서부터는 거의 일정한 값을 보이고 있다.

입구 부근인 팽창면근처에서 대체로 낮은 값을 나타내다가 $x/d=9\sim 15$ 인 지점에서 극대치를 보이고 있다. 이는 유체실험에서 보여준 재순환 유동지역과 일치하고 있다고 볼 수 있다. 유체실험에서 $x/d=22$ 인 지점부터 완전발달영역을 보이고 있는데, 이 지점에서부터 마찰계수의 값이 낮고 일정하게 유지되고 있다.

본 연구에서의 판단으로는, 급확대 유동장에서는 재순환이 크게 일어나고 있는 지점 및 재부착지역에서 마찰계수가 크게 형성되고 있다고 판단된다.

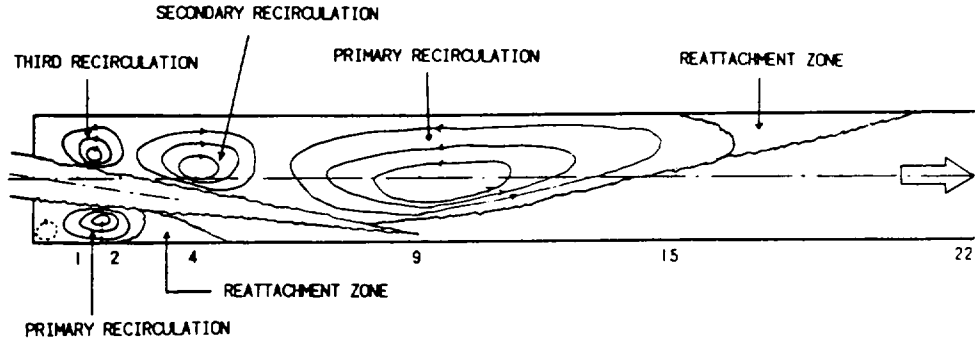


Fig. 12 Flow features in an 10° -inclined concentric expansion

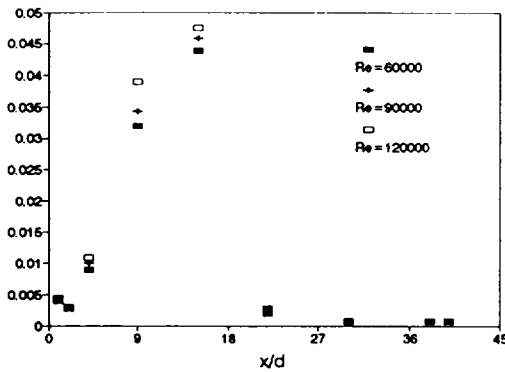


Fig. 13 Friction factors distribution for various Reynolds numbers with an 10° -inclined concentric expansion

3. 체적온도와 관벽온도 및 열전달계수

Fig. 14와 15는 각각의 레이놀드수에 따르는 체적온도(T_b)와 관벽온도(T_w)의 평균치를 나타내고 있다.

관벽온도는 각 x/d 지점의 세 측정점의 평균치를 나타내고 있으며 체적온도는 각 지점에서의 하부관벽에서 중심을 통과하여 상부관벽에 이르기까지의 전체 평균치를 나타내고 있다.

우선 체적온도를 도시한 Fig. 14를 보면, 팽창

면에서 부터 $x/d=4$ 인 지점까지는 급팽창에 의한 압력강화와 재순환 및 eddy현상 등으로 각 레이놀드수에 대해 온도의 높낮이가 일정하지 않으며, $x/d=4$ 인 지점에서 최소치를 보이다가 $x/d=9$ 인 지점을 기점으로 선형적으로 일정하게 증가하는 양상을 보이고 있다.

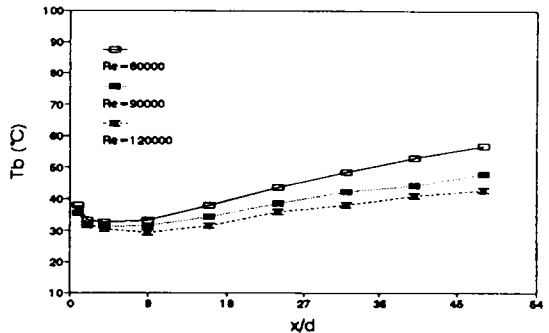


Fig. 14 Distribution of bulk temperature along the downstream for various Reynolds numbers

대체로, 레이놀드수가 클 때 체적온도(T_b)는 낮게 나타나고 있는데 이는 유체의 유동속도가 증가함에 따라 벽면에 대한 단위 체적당 열복사 시간이 짧음으로 해서 체적온도가 낮아진 것으로 보인다.

Fig. 15는 test tube의 관벽온(T_w) 분포로서, 팽창면 부근에서 각각의 레이놀드수에 대하여 대체로 낮은 온도를 보이며, 재순환유동이 강하게 일어나는 $x/d=9$ 인 지점에서 최소치를 형성하며 downstream의 완전발달 영역에서 포물선형으로 증가하고 있다.

여기에서도 체적온도의 분포와 같이 레이놀드수가 낮을수록 관벽온도는 높게 나타나는데, 이것은 유속이 낮아짐에 따라 관벽부근에 단위시간당 체류하는 시간이 길어짐으로 해서 상대적으로 높은 체적온도가 유지되어 관벽으로 부터의 열전달량이 적어지기 때문으로 판단된다.

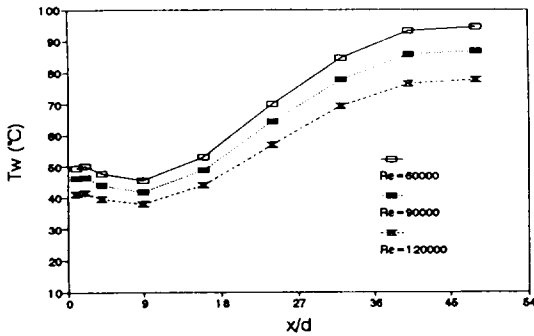


Fig. 15 Distribution of wall temperature along the downstream for various Reynolds numbers

Fig. 16, 17, 18은 레이놀드수가 60,000, 90,000, 120,000일 때의 체적온도를 test tube의 y축방향에 대해 표시한 것이다.

대체로 test tube의 입구부근에서는 급팽창으로 인한 난류발생으로 온도구배가 일정하지 않으며 유동구조에서 나타나는 core flow지역에서는 큰 유속에 의하여 열복사가 적어짐으로 해서 낮은 온도를 보이고 있다.

$x/d=24$ 인 지점에서부터 상부관벽측의 온도가

하부관벽측의 온도분포에 비하여 아주 높은 값을 보이고 있다. 이는 관 내부의 열복사 및 대류현상에 기인한다고 판단된다.

또한, $x/d=24$ 인 지점에서 downstream쪽으로 일정한 비율로 증가하는 분포를 보이고 있다. 이러한 현상은 유체거동실험에서 나타나는 완전발달 영역과 대체로 일치하고 있음을 나타낸다.

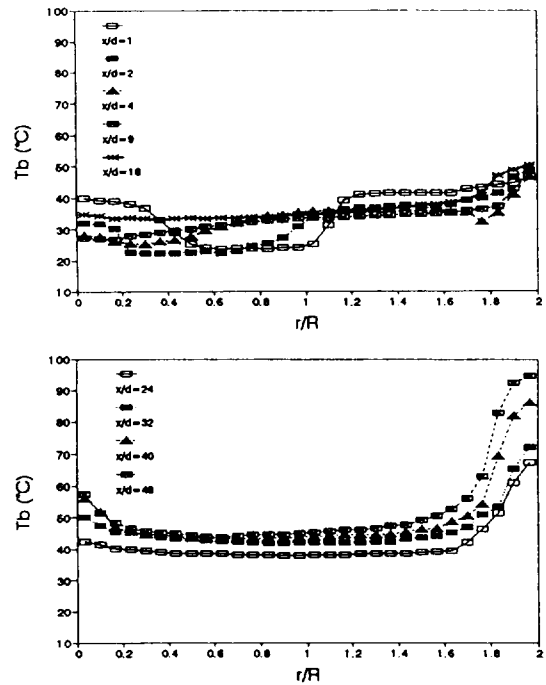


Fig. 16 Distribution of bulk temperature along the downstream for Re=60,000

Fig. 19, 20, 21은 유동장의 체적온도(T_b)의 분포를 x축 방향에 대하여 도시한 것으로서 y축의 각지점에서의 온도변화를 나타내었다.

각각의 레이놀드수에서 팽창면 부근에서의 온도 분포는 난류로 인하여 불규칙한 분포를 보이며,

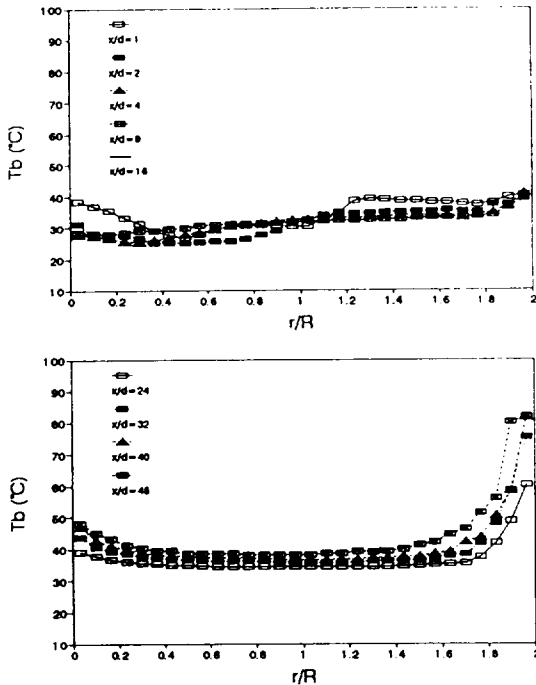


Fig. 17 Distribution of bulk temperature along the downstream for Re 90,000

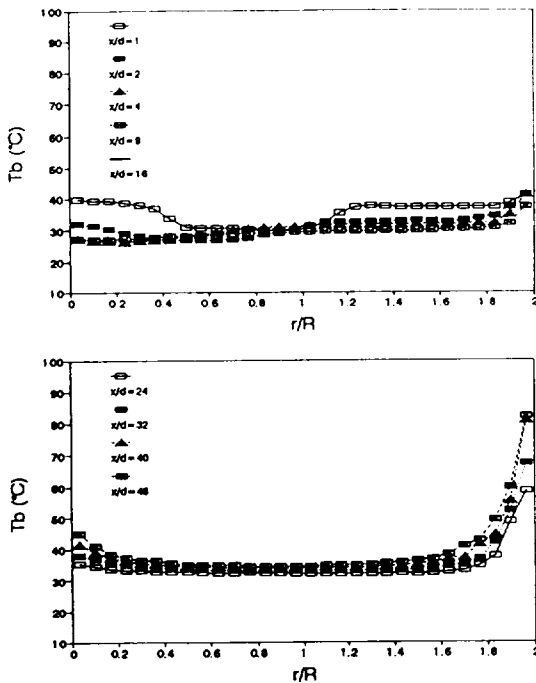


Fig. 18 Distribution of bulk temperature along the downstream for Re=120,000

$x/d=16$ 인 지점에서부터 규칙적이며 안정된 증가 폭을 보이고 있다. 같은 지점에서 레이놀드수가 낮을 수록 높은 온도분포를 보이며, 특히 유동장의 상부벽면근처에서는 레이놀드수가 낮을 수록 아주 큰 폭으로 증가하고 있다.

Fig. 22는 경사팽창의 열전달 실험인 본 연구에서 얻어진 Nu/Nu_{DB} 수를 레이놀드수에 따라 도시한 것이다.

도시한 바와 같이 관입구 영역인 $x/d=1$ 에서부터 $x/d=48$ 지점까지의 분포를 측정하였는데, 팽창면 입구근처에서는 coner eddy 및 재순환에 의하여 아주 높은 불규칙한 Nu수의 분포를 보여 도시한 자료에는 표기하지 않았다.

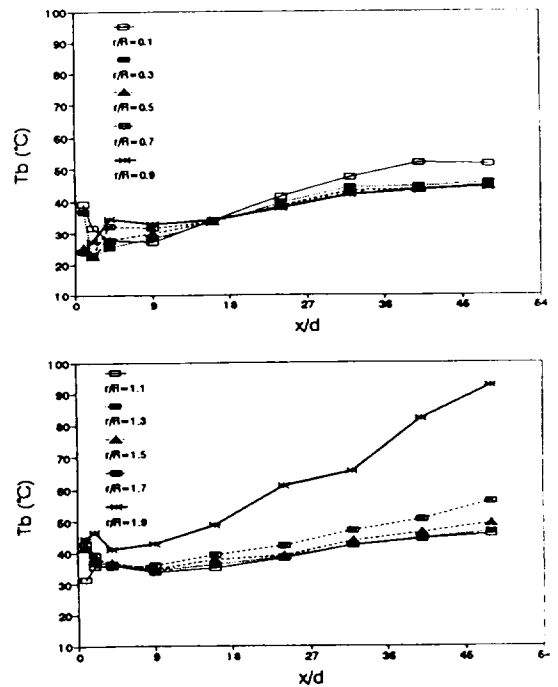


Fig. 19 Distribution of bulk temperature along the downstream for Re=60,000

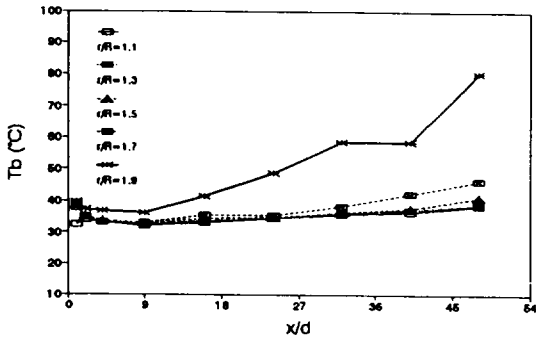
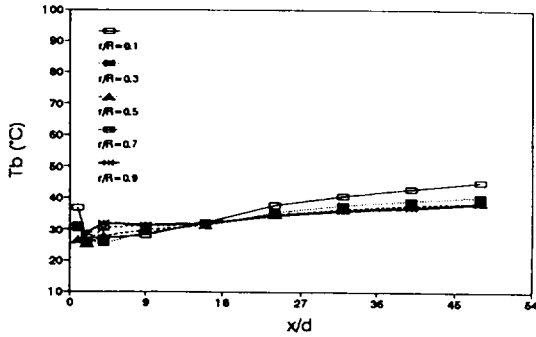


Fig. 20 Distribution of bulk temperature along the downstream for $Re=90,000$

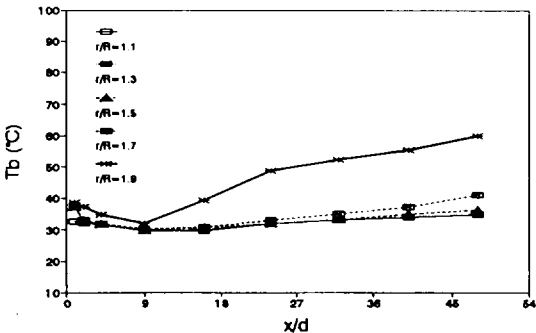
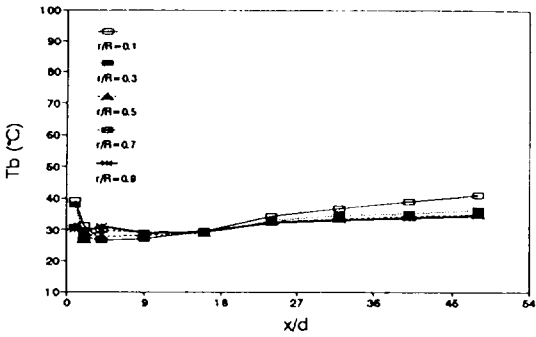


Fig. 21 Distribution of bulk temperature along the downstream for $Re=120,000$

그림에서와 같이 관입구역에서 아주 높은 Nu/Nu_{DB} 를 보이다가 $x/d=9$ 까지 급격히 감소하여, 다시 $x/d=16$ 에서 정점을 이루며 서서히 감소하여 downstream의 완전발달 일정하게 유지되었다.

본 실험에서는, 팽창면에서의 아주 큰 열전달현상을 무시했을 때, $x/d=16$ 인 지점에서 열전달계수 및 Nu/Nu_{DB} 가 최대치를 이루고 있다.

이것을 유체거동실험의 자료와 비교하면, 유동장의 재부착구역 중앙부근에서 Nu/Nu_{DB} 가 최대값을 나타내고 있다고 판단된다.

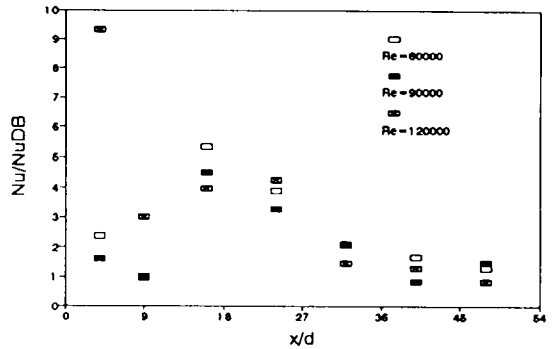


Fig. 22 Distribution of Nu/Nu_{DB} along the downstream for various Reynolds numbers with an 10° inclined concentric expansion

결론

중심이 같고 경사진 입구를 갖는 급확대 팽창에서 균일한 열유속을 갖는 유동장의 난류유동을 레이놀드수가 60,000과 90,000 및 120,000에서 실험 및 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 팽창면으로 부터, 하부관벽에서는 $x/d=2$, 상부관벽에서는 $x/d=15$ 인 지점까지 재순환유동이 일어났다.

2) 레이놀드수의 증가에 관계없이 $x/d=22$ 에서 완전발달영역을 보이기 시작했다.

3) 유동공기가 시험관으로 하향입사됨으로 해서 하부관벽측에서는 3 step heights를 전후해서 재부착구역이 나타나며, 상부관벽측에서의 재부착구역은 15 step heights에서 22 step heights에 걸쳐 넓은 범위에서 형성되었다.

4) 관마찰계수는 $x/d=15$ 인 지점에서 최고치를 보였으며, 그 이후 downstream쪽으로 급격하게

감소하는 경향을 보였다.

5) Downstream에서 체적온도는 레이놀드수가 낮을수록 높게 나타났으며, 재부착영역내의 $x/d=9$ 인 지점에서 최소치를 보였다.

6) 열전달계수와 Nu/Nu_{DB} 는 $x/d=16$ 인 지점에서 최고치를 나타내었다. 이것은 유체거동에서의 재부착구역의 중앙부와 일치하고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Back, L. H. and E. J. Roschke, 1972, "Shear-Layer Flow Reheims and Wave Instabilities and Reattachment Lengths Downstream of an Abrupt Circular Channel." ASME Trans., Journal Applied Mechanics, 677-688.
- 2) Baughn, J. W., M. A. Hoffman, R. K. Takahashi and B. E. Launder, 1984, "Local heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Channel with Constant Wall Heat Flux." ASME Trans., J. of Heat Transfer, Vol. 106, 789-796.
- 3) Vrighton, J. A. and J. B. Jones, 1964, "Fully Developed Turbulent Flow in Annuli," Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, 835-844.
- 4) Dellenback, P. A., D. E. Metzger and G. P. Neitzel, 1987, "Heat Transfer to Turbulent Swirling Flow through a Sudden Axisymmetric Expansion" ASME Trans., J. of Heat Transfer, Vol. 109, 613-620.
- 5) Habib, M. A. and D. M. McEligot, 1982, "Turbulent Hert Transfer in a Swirl Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion." Proc. of the 7th Int. Hert Transfer Conf., Washington, D.C, 159-165.
- 6) 강필오, 1993, "An Experimental Study of the Turbulent Flow and Heat Transfer Downstream of an Axisymmetric Abrupt Expansion in a Circular Pipe." 제주대학교 석사학위 논문.
- 7) 권기린, 이상배, 장태현 등, 1993, "An Experimental Study of the Swirl Flow and Heat Transfer Downtream an Abrupt Expansion in a Cicular Pipe with Uniform Heat Flux." 대한기계학회 '93년도 추계학술학회 논문집(II), 211-215.
- 8) Krall, K. M. and E. M. Sparrow, 1966, "Turbulent Heat Transfer in the

- Separated, Reattached and Redevelopment Regions of a Circular Tube." ASME Trans. J. of Heat Transfer, Series C, Vol. 88(1), 131-136.
- 9) Moon, L. F. and G. Rudinger, 1977, "Velocity distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct." Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, 226-230.
- 10) Sparrow, E. M. and A. Chaboki, 1984, "Swirl-Affected Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular Tube." Transactions of the ASTM, Journal of Heat Transfer, 766-778.
- 11) Sultanian, B. K., 1984, "Numerical Modeling of Turbulent Swirling Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion." Arizona State University, the Degree of Doctor of Science.
- 12) Zemanick, P. P. and R. S. Dougall, 1970, "Local Heat Transfer Downstream of Abrupt Circular Pipe Expansion." Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 53-60.