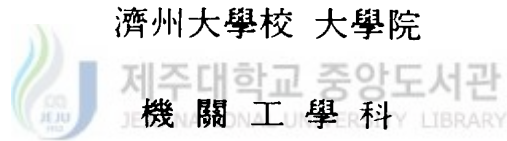


碩士學位 論文

均一한 熱流速을 갖는 急膨脹圓管內的  
亂流流動特性에 關한 實驗的 研究



姜 弼 五

1993年 12月

均一한 熱流速을 갖는 急膨脹圓管內의  
亂流流動特性에 關한 實驗的 研究

指導教授 權 麒 麟

姜 弼 五

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함.

1993年 12月

제주대학교 중앙도서관  
姜 弼 五의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 許 鐘 哲

委 員 권 기 리

委 員 김 키 석

濟州大學校 大學院

1993年 12月

---

An Experimental Study of the Turbulent Flow and  
Heat Transfer Downstream of an Axisymmetric  
Abruptly Expansion in a Circular pipe

Phil-Oh Kang

(Supervised by professor Ki-Rin Kwon)

A THESIS SUBMITTED IN PRACTICAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ENGINE TECHNOLOGY  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1993. 12.

# 목 차

NOMENCLATURE	2
SUMMARY	4
I. 서 론	5
II. 실험장치 및 방법	7
1. 실험장치	7
2. 실험방법	12
2.1 유속측정	12
2.2 관마찰계수측정	13
2.3 체적온도와 관벽온도측정 및 열전달계수	13
III. 실험결과 및 고찰	15
1. 팽창비와 레이놀드수	15
2. 축방향속도분포	18
3. 관마찰계수	26
4. 체적온도와 관벽온도 및 열전달계수	28
IV. 결 론	35
V. 참고문헌	37

## Nomenclature

Symbol	Description
d	: upstream tube diameter (mm)
D	: downstream tube diameter (mm)
f	: friction factor (Dimensionless constant)
H	: step height $(D-d)/2=H$ (Dimensionless constant)
h	: heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
k	: thermal conductivity of air ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
R	: radius of the downstream tube (mm)
r	: radial local distance from downstream center(mm)
x	: axial distance from expansion face (mm)
u	: local velocity (m/s)
$\bar{u}$	: mean axial velocity in upstream tube(m/s)
$\dot{m}$	: local mass flow rate ( $kg/m^2$ )
$\rho$	: air density at actual condition ( $kg/m^3$ )
$C_p$	: specific heat at constant pressure( $KJ/Kg \cdot ^\circ C$ )
$P_t$	: total pressure ( $kg/m^2$ )
$P_a$	: velocity pressure ( $kg/m^2$ )
$P_s$	: static pressure ( $kg/m^2$ )
$T_w$	: wall temperature ( $^\circ C$ )

---

$T_b$	:	bulk temperature ( ° C)
$Re$	:	Reynolds number in upstream tube
$Nu$	:	Nusselt number
$Pr$	:	Prandtl number
$dp$	:	pressure gradient ( $N/m^2$ )
$dx$	:	axial distance between the measuring stations(m)
$Nu_{DB}$	:	Nusselt number determined by Dittus-Boetler eq.

## SUMMARY

Experiments were carried out for the turbulent flow and heat transfer downstream of an axisymmetric abrupt expansion in a circular pipe with a constant wall heat flux.

The uniform heat flux condition was imposed to the downstream of the abrupt 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 to 140,000 (based on upstream diameter). Experiments were tested with air as working fluid.

The results obtained are summarized as follows :

1) The location of the  $Nu/Nu_{DB}$  showed at the point of 4 step heights for  $Re=80,000, 100,000$  of the abrupt concentric expansion.

The value of  $Nu/Nu_{DB}$  showed at the point of 3 step heights for  $Re=120,000, 140,000$ .

2) Axial velocity increased rapidly at  $r/R=0.6$  in the abrupt concentric expansion turbulent flow through the test tube.

3) Friction factors of the test tube showed a constant value at  $x/d=13$  and regardless of the inlet flow boundary condition.

4) For all Reynolds number, the wall temperature showed a curve of parabolic variation at  $24 \leq x/d \leq 59$ .

The bulk temperature showed a minimum value at  $x/d=6\sim 9$ , but it showed a linear distribution of increase.

## I. 서 론

급팽창을 통한 관로내의 난류유동에서는 관로의 입구영역, 특히 재부착영역에서는 박리로 인한 난류운동에너지의 증가로 완전발달된 유동에서 얻을 수 있는 것보다도 실질적으로 더 큰 혼합율과 열전달계수를 만든다고 알려져 오고 있으며(Baughn et.al, 1984; Dellenback et.al, 1987), 1948년 Boetler 등은 관로내에 있어서, 박리되고 재부착된 유동에서의 공기의 열전달계수에 관한 실험적 연구결과, 재부착점 부근에서의 최대열전달계수는 완전히 발달된 유동값의 약 4배임을 보고한 바 있다.

에너지파동이후 에너지의 효율적 이용에 대한 강조가 나날이 높아지면서 이 분야에 대한 실험적 연구가 더욱 활발히 진행되어 오고 있으며(Emerson et.al, 1966; Gooray et.al, 1985; Habib et.al, 1982), 최근에는 급팽창되는 원관내 난류열전달에 대한 수치해석적 방법을 선택하여 종전의 실험적 연구결과와 비교검토하는 사례가 많아지고 있다(이 등, 1992; Nakanishi et.al, 1992; Gooray et.al, 1985; Baugh et.al, 1984; Jonson et.al, 1982; Zemanick et.al, 1970).

그러나, 이와같이 급팽창관에 대한 실험적 연구 및 수치해석적 분석결과에도 불구하고, 급팽창관에서의 열전달은 그 형상의 급변화에 의한 유동의 불안정, Corner eddy 부근에서의 유동의 불안정, 재순환유동의 형성으로 인하여 난류전단층의 발생 등, 그 유동구조가 극히 복잡하고 난해한 관계로 열전달메카니즘의 상세함은 아직도 명확히 규명되지 못하고 있다.

따라서, 박리와 재순환유동에 대해 더 깊이 이해하고 급팽창면에서 부



터 완전히 발달된 유동영역에 이르기까지 분사류가 가지는 분사각, 분류 경계면, 난류구조 및 열전달효과등 유동장의 특성에 대하여 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 팽창관의 입구조건은 팽창비를 0.33으로 하고 레이놀드 수를 보다 크게하여 공기가 증앙으로 유입될때, 급팽창하는 난류유동의 축방향속도성분 거동을 관찰함과 아울러 이 유동장에 균일한 열플럭스를 주었을때 균일열플럭스가 이 유동에 미치는 영향을 파악하여, 각종 열기기의 설계와 연소시스템에서의 연소현상 해석에 기초적인 참고자료를 얻고자 하였다.



## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험장치

Fig. 1은 열전달실험을 위한 전체적인 실험장치이다.

본 유체특성실험에 사용한 Test tube는 크게 upstream tube와 downstream tube로 구별할 수 있는데 이를 세분하여 설명하면 다음과 같다.

유체팽창시험을 위해 사용된 upstream tube는 내경이 50mm, 두께가 5mm, 길이가 1,500mm인 투명 아크릴관을 사용하였으며(Fig. 1의 ①), downstream tube는 내경이 150mm, 두께가 5mm, 길이가 2,200mm인 투명 아크릴관을 사용하였다(Fig. 3)

또한, 관벽의 압력과 유속을 측정하기 위하여 아크릴관의 측면과 윗면에 구멍을 뚫고, 정압측정을 위하여 관측면에는  $\varnothing 7\text{mm} \times L30\text{mm}$ 의 동관을 설치하였으며, 상부에는 유속을 측정하기 위하여 피토우 튜브를 설치하였다.

Test tube의 끝부분에는 평균유속을 측정하기 위하여 구조용 강관을 플랜지로 연결하고 구조용 강관 상부에 하나의 구멍을 뚫어 멀티피토우 튜브(Tobar 301)을 설치하였다(Fig. 1의 ③).

다시 실험장치를 가변 송풍기에 연결하여 실내공기를 흡입시킴으로써 유동장을 만들 수 있었으며, 멀티피토우 튜브의 압력측정공을 미압계에 연결함으로써 평균유속을 읽어 레이놀드수를 결정하였다.

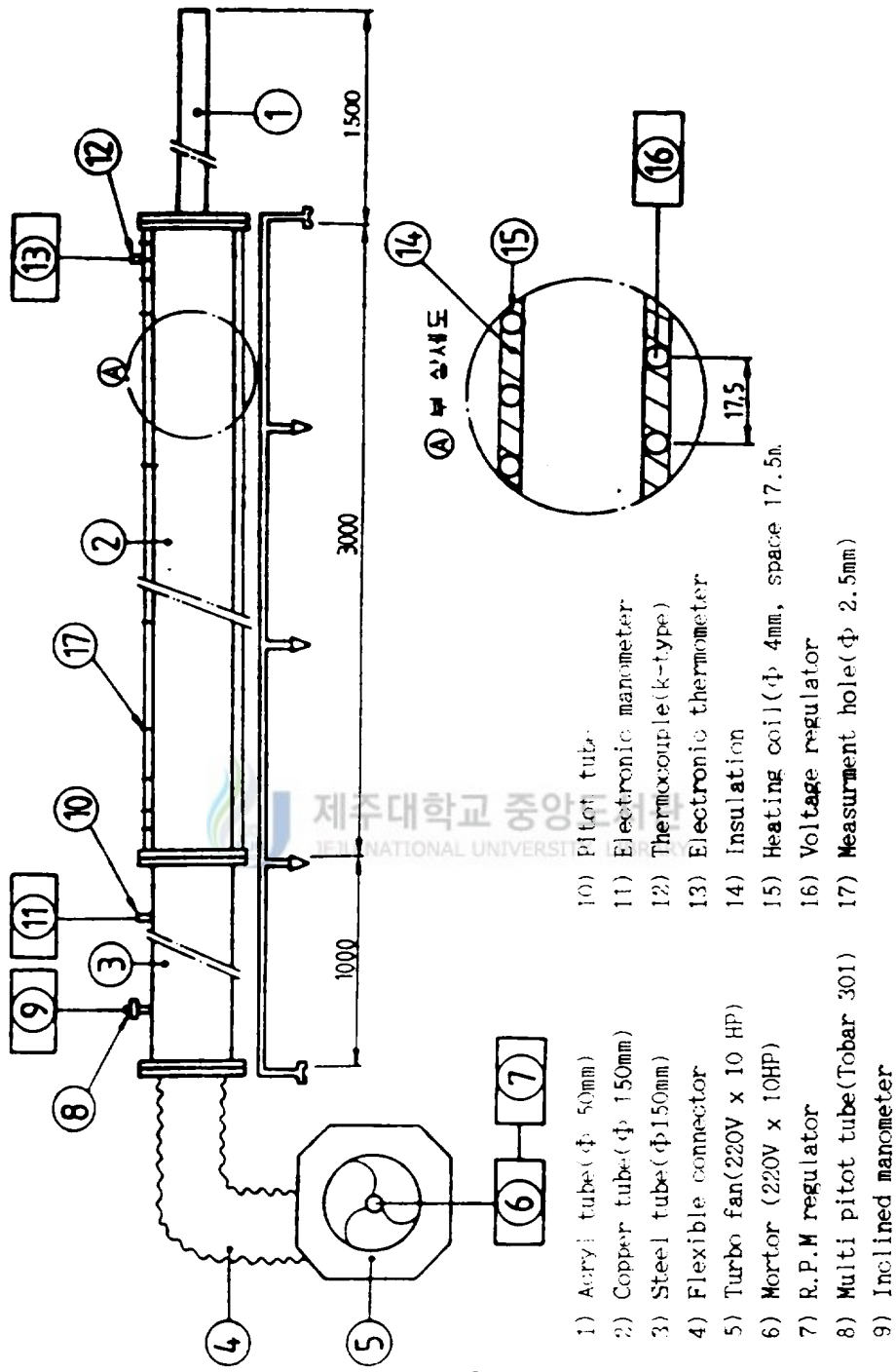


Fig. 1. Schematic diagram experimental apparatus.

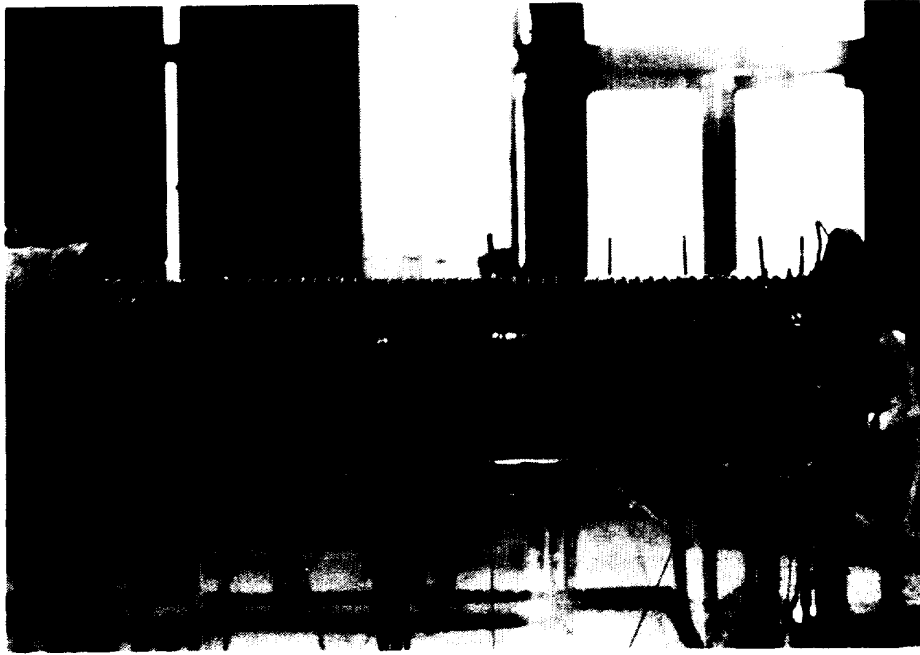


Fig. 2. Photograph of the test tube mounted with heating coil.

또한, 송풍기의 회전수를 변경, 조절함으로써 유속을 조절하여 레이놀드 수를 쉽게 얻을 수 있었으며, 이때에 측정된 동압을 데이터처리하여 관마찰계수를 산출하는 기초자료로 활용하였다.

열전달실험을 위하여 downstream부분은 아크릴관과 동관을 교체하여 실험하였다(Fig. 2).

열전달실험에 사용한 Test tube는 내경이  $\phi 150\text{mm}$ , 두께가 5mm, 길이가 3,000mm인 동을 재료로 하여 제작하였다. 또한, Test tube의 내부를 흐르는 유체의 온도를 측정하기 위하여 상부에 구멍을 뚫어  $\phi 7\text{mm} \times \text{L}30\text{mm}$ 인 동관을 설치하여 열전대를 삽입하고 지지대를 설치하였다.

그리고 Test tube의 내부를 흐르는 유체의 온도 및 관벽온도를 측정하기 위하여 K type 열전대를 Test tube의 동일한 원주상에 90도 간격으로 설치하였으며, Fig. 4에서 처럼 축방향으로 모든 측정위치에 같은 방법으로 설치하였다.

그리고 이 Test tube에 균일가열(uniform heating)을 유지하기 위하여 heating coil( $\phi 2.5\text{mm}$ )을 균일한 간격(17.5mm)으로 감았으며, 열량의 손실을 막기 위하여 test section의 외부를 석면 테이프로 감았다(Fig. 2).

Fig. 3, 4에서 표시된 번호는 다음과 같다.

1) 팽창면으로부터 거리(x) : 관마찰계수를 구할때 측정점간의 거리 산출기준이 되며 속도와 온도를 측정하기 위하여 팽창면으로부터 측정위치까지 거리이다.

2) 측정위치(x/d) : 측정위치까지의 거리를 upstream tube의 직경으로 나눈 값으로 관마찰계수, 속도 및 열전달계수를 나타내는데 필요로 하는 무차원상수이다.

3) Fig. 4에서 열전대의 설치 갯수를 나타내고 있으며 동일원주상에 90도 간격으로 설치하였다.

아래의 그림은 속도측정 및 열전달실험을 위하여 아크릴 튜브와 동관의 축방향에 대하여 측정위치 및 열전대의 설치위치와 설치숫자를 나타내고 있다.

- 1) 0 50 100 200 450 800 1100 1200 1600 1900 2100 2200
- 2) 1 2 4 9 16 22 24 32 38 42

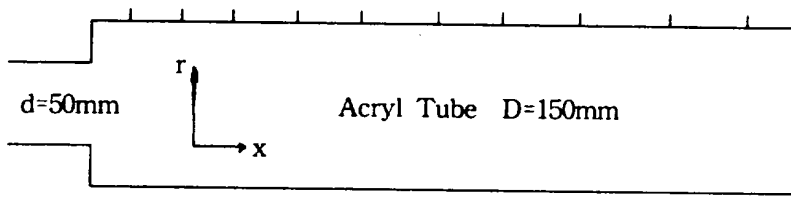


Fig. 3. Velocity measurement positions of downstream tube.

- 1) 0 30 50 100 150 200 300 450 800 1200 1600 2000 2400 2800 2900 2950 3000
- 2) 0.6 1 2 3 4 6 9 16 24 32 40 48 56 58 59
- 3) 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

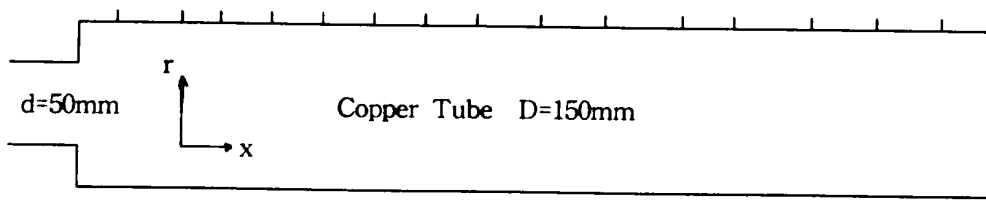


Fig. 4. Temperature measurement positions for heat transfer experiment.

## 2. 실험방법

### 2.1. 유속측정

Test tube에 설치되어 있는 멀티피토우 튜브의 측정공에 미압계를 연결하고 공기를 흡입시켜 유동장이 안정된 후에 upstream tube에서의 국부 유속을 측정하여 공기의 평균속도는 구하고 레이놀드수를 결정하였다.

레이놀드수를 결정한 후에 downstream tube의 중앙에 피토우 튜브를 설치하고 측정공을 미압계와 연결시킨 후, 측정하려는 지점에서 피토우 튜브를 관벽으로부터 관중심에 이르기까지 일정한 간격으로 이동 시키면서 모든 측정점의 측방향속도를 측정하였다.

이때 측정하지 않는 Test tube의 전압 및 정압 측정공을 모두 막아서 압력의 오차를 줄였다. 또한, 공기의 유동이 팽창관의 중앙으로 유입될때 downstream에서의 동압을 측정하여 (1)식으로 유속을 구하였다.

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

( 단,  $P_t = P_a + P_s$  )

## 2.2. 관마찰계수 측정

유속측정때와 마찬가지로 방법으로 멀티피토우 튜브의 압력으로 부터 레이놀드수를 결정한 다음, Test tube내의 유동상태가 안정된 후 downstream tube의 압력손실을 모든 측정위치에서 미압계로 측정하여 관마찰계수를 다음 식으로 구하였다.

$$f = \frac{(-dp/dx) \cdot D}{1/2 \rho \cdot \bar{u}^2} \text{-----}(2)$$

## 2.3. 체적온도와 관벽온도측정 및 열전달계수

전항과 마찬가지로 방법으로 실내 공기를 유입시키고, 레이놀드수를 결정한 다음, 정상상태에서 downstream tube의 외벽에 감겨있는 Heating Coil에 A.C.전원(AC 220V, 7.5A)을 연결하여 열플럭스를 일정하게 공급하였다.

그리고, 각 측정위치에 열전대를 삽입하여 관벽으로 부터 관중심에 이르기까지 각각 정해진 간격(관벽으로 부터 1 mm, 2mm이후에는 5mm 간격)으로 시험관 내부를 흐르는 유체의 온도를 측정하고 체적온도를 계산하였으며 이 온도들로 부터 식(3)을 이용하여 국소열유속을 계산하였다.



그리고 관벽온도는 Test tube의 외벽에 장치한 열전대로 부터 측정하고, 측정계산한 유체의 체적온도와 관벽온도로 부터 식(4)를 이용하여 열유속을 구하였으며 두 측정점간의 열전달계수를 (5)식으로 구하였다.

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

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

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

또한, 이 대류 열전달계수와 체적온도에 따른 열전도율( $k$ )을 찾아 (6)식에 대입하여 Nusselt수를 구하였다.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad \text{-----}(6)$$

그리고, 매그러운 파이프내의 유동장에서 유동이 완전발달 되어 있을때 Nusselt수를 Dittus-Boetler 방정식(7)을 이용하여  $Nu_{DB}$ 를 계산하여 완전히 발달된 유동이 형성되기까지 열전달분포를 비교하였으며, 팽창면으로부터 측정점까지 거리를 무차원화하여  $Nu/Nu_{DB}$ 의 값과 Baugh(1984)의 실험치와 비교하여 도시화 하였다.

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

### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. 팽창비와 레이놀드수

Fig. 5는 공기의 유동을 시험관의 중앙으로 유입팽창시킨 상태에서 팽창비가  $d/D=0.33$ 인 본 실험장치에서 upstream tube와 downstream tube에서의 속도와 레이놀드수의 관계를 도시한 것이다.

그리고 레이놀드수의 변화에 따른 속도변화를 살펴보면 본 실험장치에서 평균속도비는 9:1임을 알 수 있다.

Fig. 6은 팽창비와 레이놀드수의 관계를 나타낸 것이다.

본 실험장치에서는 upstream tube와 downstream tube의 레이놀드수는 약 3배가 되었으며, downstream tube에서의 레이놀드수는 3:1로 비례하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 표현방법을 달리하여 Fig. 6(a)의 x축을 정수화하여 나타냈다.

급팽창하는 경우, upstream tube의 입구속도를 일정하게 하고 팽창비를 변화시켰을때, upstream tube와 downstream tube의 레이놀드수가 팽창비 만큼 반비례하고 있음을 알 수 있다.

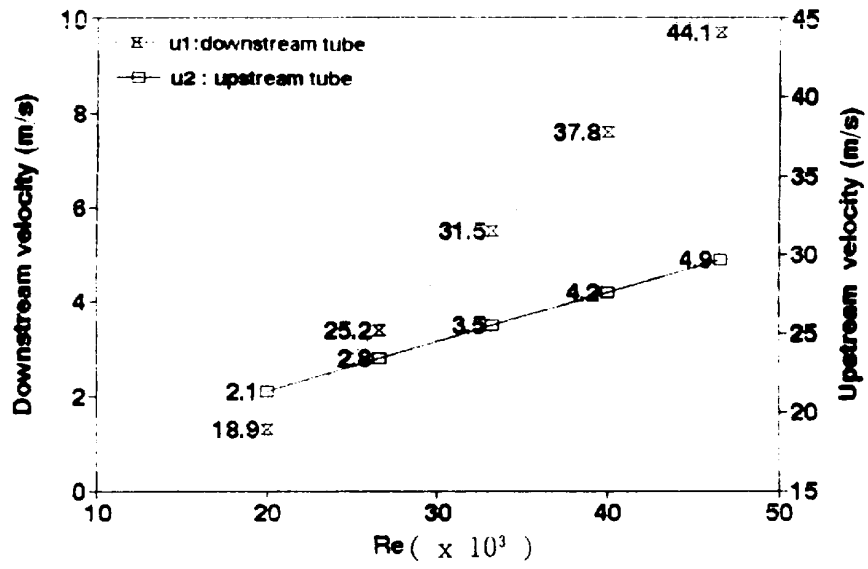


Fig. 5. Comparison of downstream and upstream velocity for various Reynolds numbers.

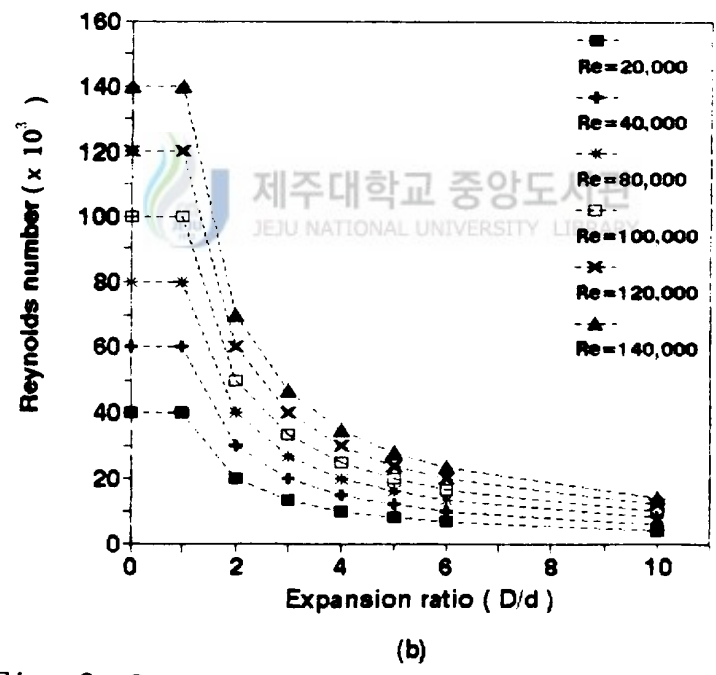
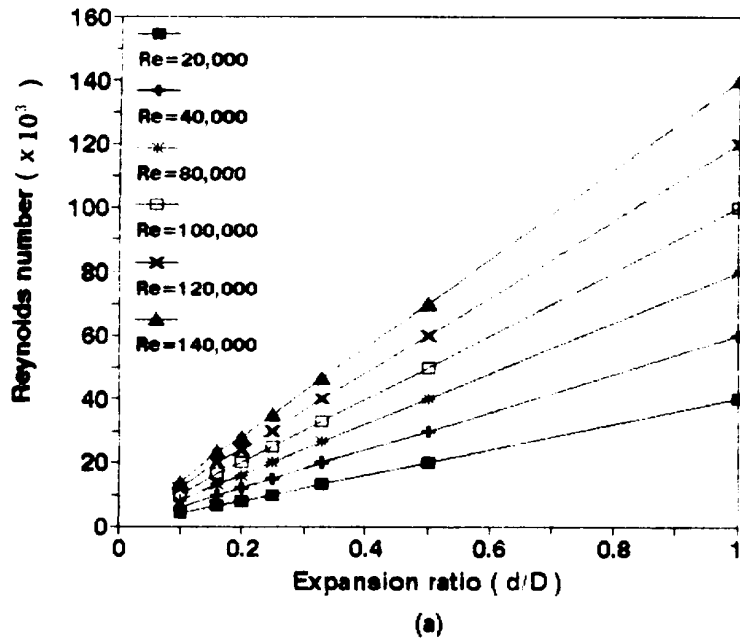


Fig. 6. Comparison of Reynolds numbers for various expansion ratios (a), (b).

## 2. 축방향속도분포

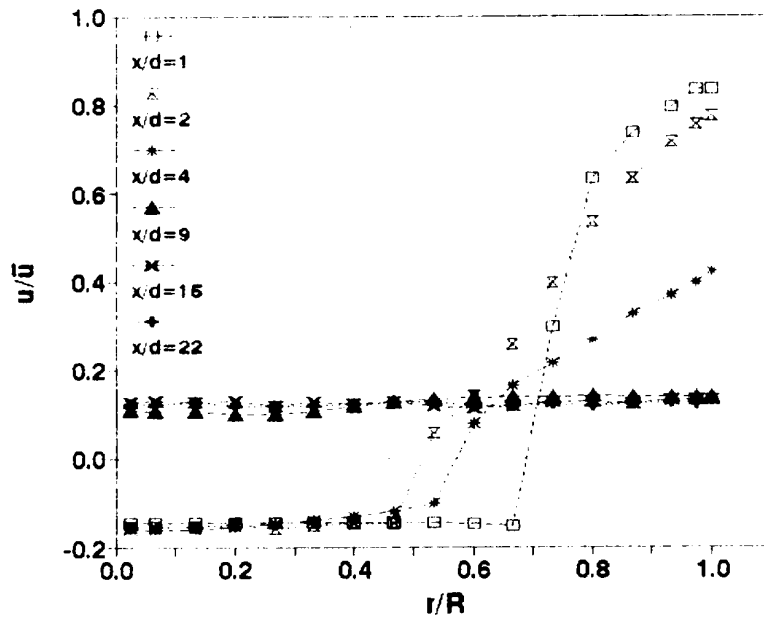
Fig. 7(a), (b), (c), (d)는 공기의 유동을 시험관의 증앙으로 유입팽창시킨 상태하에서의 축방향속도를 측정한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 알수있는 바와 같이, 각각의 Re수에서 난류유동의 축방향속도는 팽창면으로부터  $x/d=4$ 까지는 관벽에서  $r/R=0.47$ 사이에서 속도가 거의 일정하였으나  $r/R=0.6$ 이후 관중심에 이르기까지 급격히 증가 하였으며  $x/d=9$ 이후는 downstream에서  $r/R$ 에 관계없이 균일한 속도분포를 보이므로 완전히 발달된 유동영역임을 알 수 있으며, 또한, 관중심으로 갈수록 속도가 높다는 것을 알 수 있다. 이를  $k-\epsilon$  모델을 이용하여(이 등, 1992) 수치해석결과와 비교하면  $x/d=1$ 에서의 실험치와 유형이 일치하고 있다.

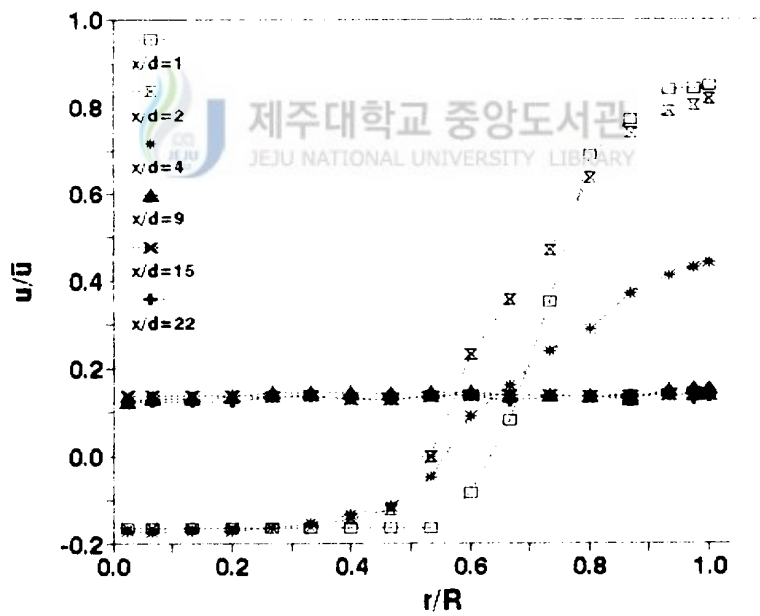
그리고 관벽면에서 부터  $r/R=0.5$ 사이와 팽창면으로부터  $x/d=4$ 사이에서 부(-)의 값이 나타나고 있지만 실제적으로는 서로 유동방향이 다르기 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 6을 세분하여 보면 보다 쉽게 이해할 수 있다.

Fig. 7을 구간별로 분석하면 Fig. 8, 9, 10과 같다.

먼저, Fig. 7에서 parameter를 다르게 하여  $r/R=0.03\sim 0.33$ 사이에서 다시 그려보면 Fig. 8에서 알 수 있는 것처럼 각각의 Re수에 관계없이  $x/d=9$  이상에서는 양의 값을 갖고  $x/d=4$ 이하에서는 부(-)의 값을 갖고있다. 이것은 유동방향이 서로 반대방향임을 나타내는 것으로써 위에 나타난 구간에서 팽창면으로부터  $x/d=9$ 이하에서 재순환유동이 발생된 것으로 사료된다.



(a)  $Re=80,000$



(b)  $Re=100,000$

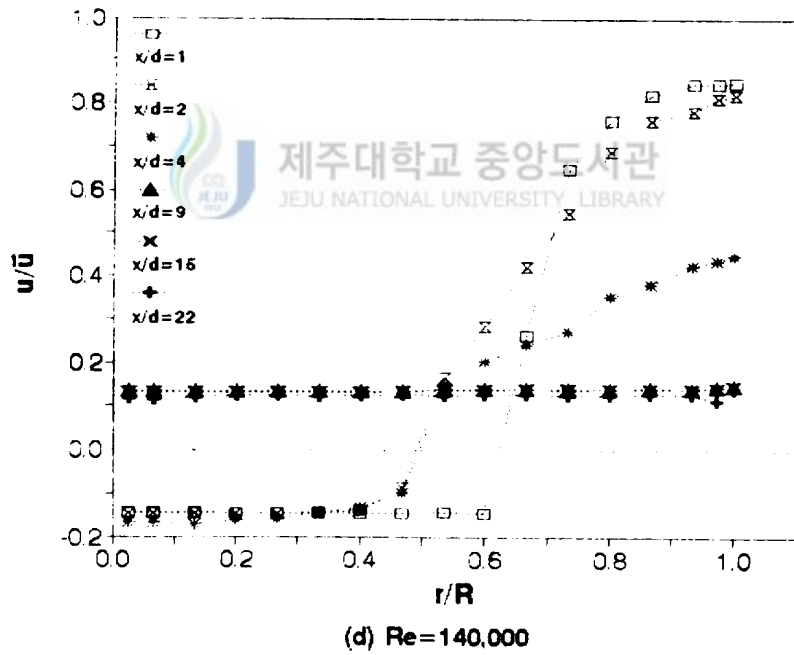
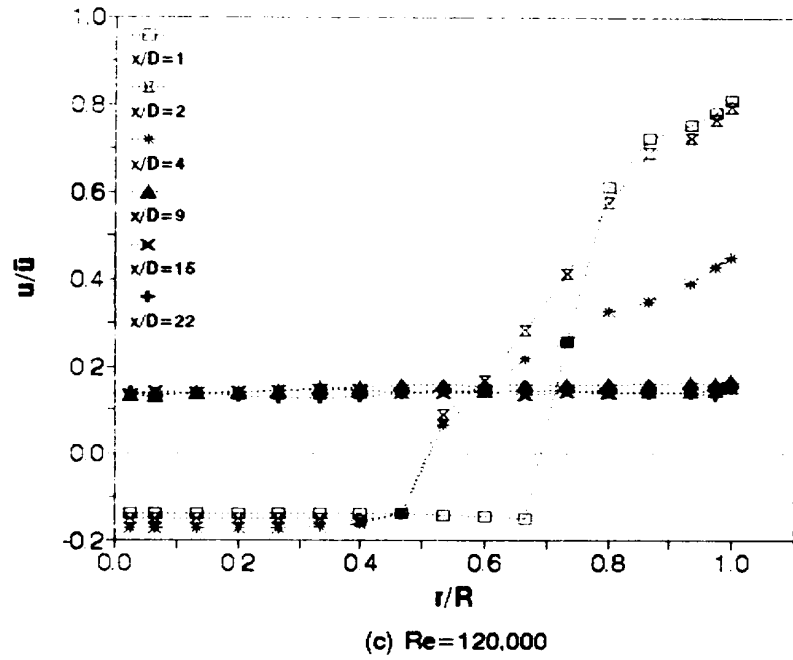


Fig. 7. Axial velocity profiles for various Reynolds numbers with a concentric expansion (a), (b), (c), (d).

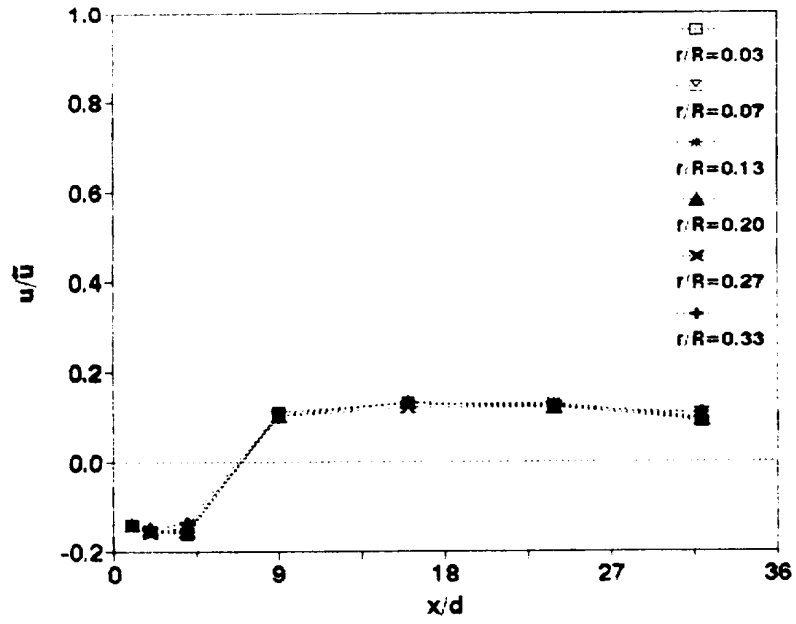


Fig. 8. Streamlines and steady flow from  $r/R=0.03$  to  $r/R=0.33$  for various Reynolds numbers with a concentric expansion.



그리고  $x/d=9$  이후 부터는 일정한 속도를 가지므로 완전히 발달된 유동 영역으로 사료된다.

다시 Fig. 7에서 parameter를 다르게 하여 그려보면 Fig. 9 (a), (b)에서 알 수 있다.

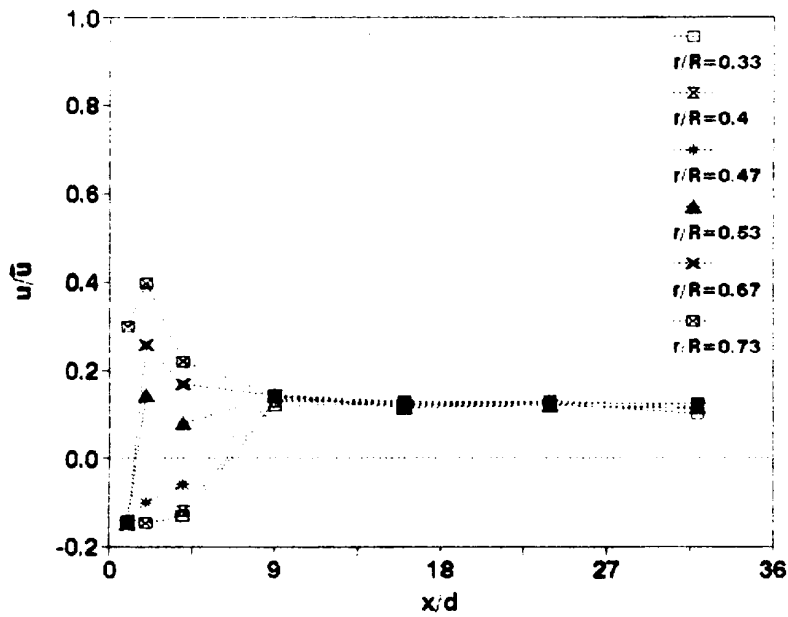
$r/R=0.33\sim 0.73$ 사이에서  $x/d=2$ 일때가 속도가 높아지고 그 이후부터는 서서히 속도가 떨어지고 안정화되어있다.

이러한 모습은 관중심과 관벽사이에서 corner eddy현상에 의한 역류현상의 일부이며 순환유동의 한 부류로 생각되어진다. 그리고  $x/d=9$ 부터는 완전히 발달된 유동영역으로 추정된다.

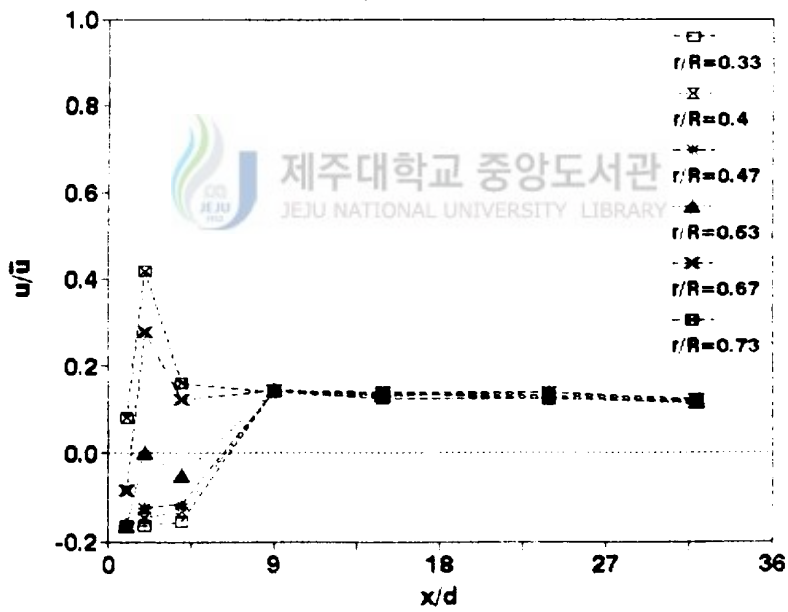
이러한 제반현상을 Jonston(1978)의 결과에 의하여 분석하면 재순환영역내에서의 역류현상이 발생했기 때문으로 여겨지며, 본 실험치에서 재부착거리는  $x/d=4\sim 9$ 사이에 있는 것으로 사료된다.(Fig. 8, 9).

Fig. 7에서  $r/R=0.8\sim 1.0$  사이에서 parameter를 다르게 하여 그려보면 Fig. 10(a), (b), (c), (d)에서 알 수 있듯이 관중심에서 높았던 속도가 급팽창으로 인하여 유동압력이 떨어지고 downstream으로 이동하면서 팽창면에서 부터  $x/d=9$ 까지 급격히 떨어졌다.

그리고  $x/d=9$ 이후부터는 안정된 속도를 나타내므로 완전발달된 유동영역이며 이 구간에서 순환유동은 일어나지 않았다.

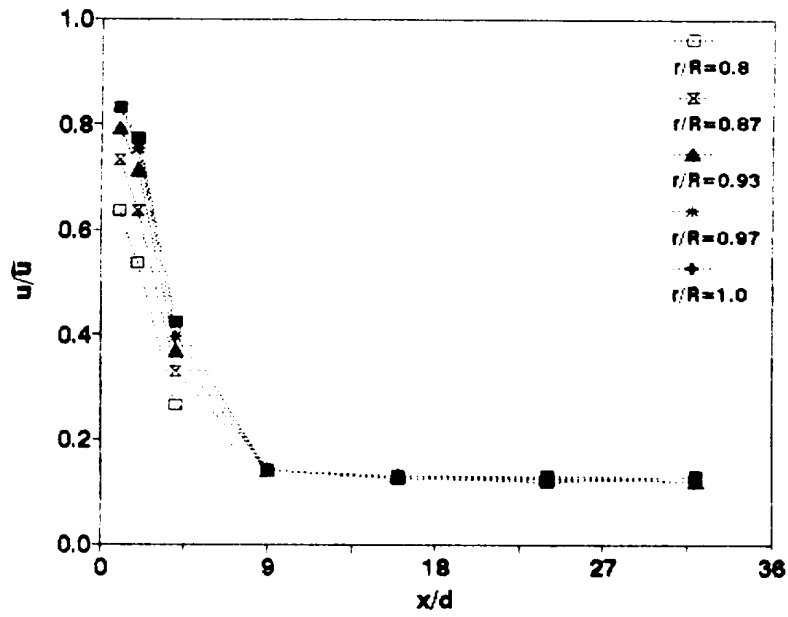


(a)  $Re=80,000$

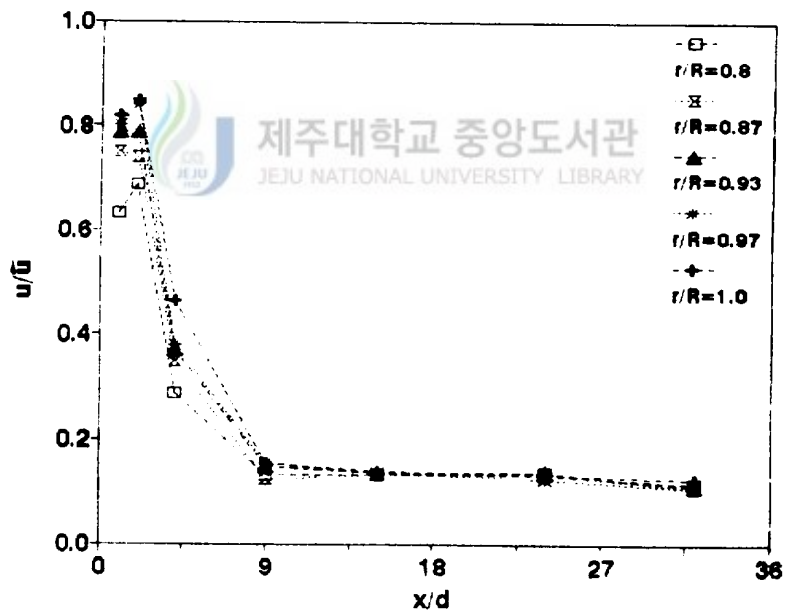


(b)  $Re=100,000$

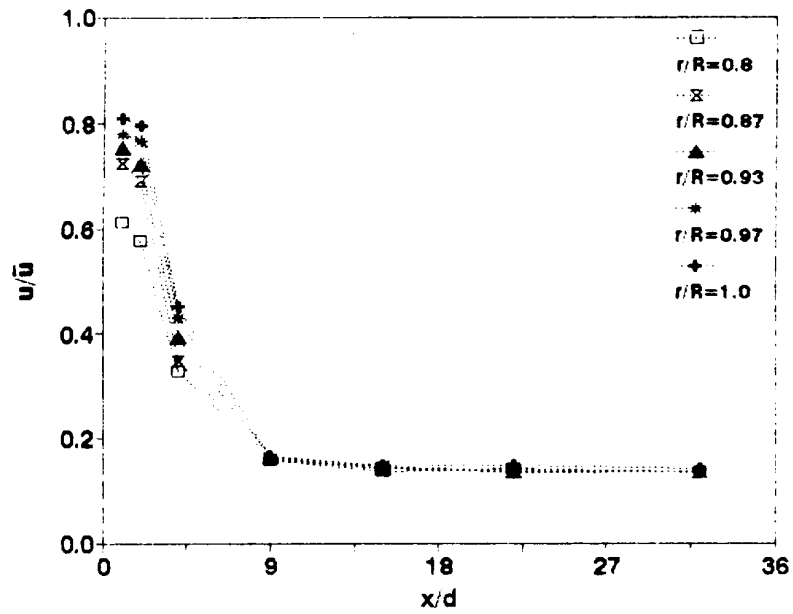
Fig. 9. Streamlines and steady flow from  $r/R=0.33$  to  $r/R=0.73$  for various Reynolds numbers with a concentric expansion.



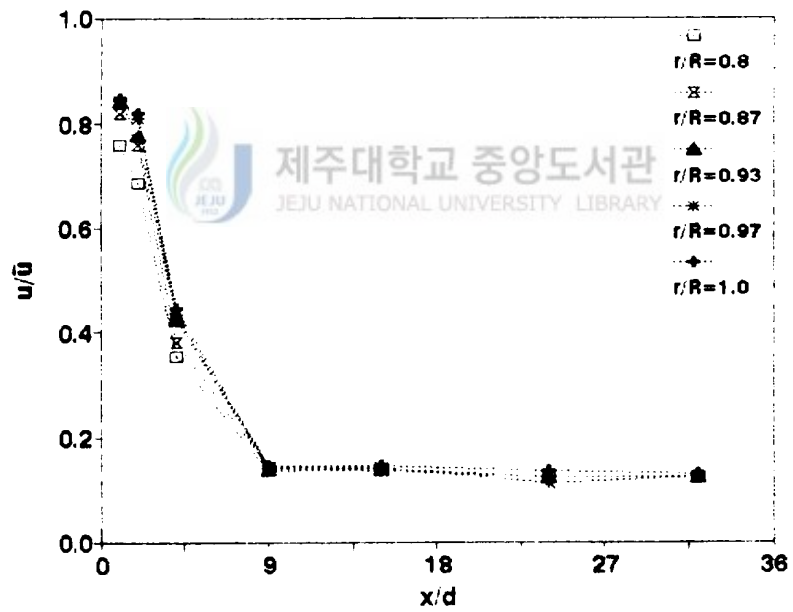
(a)  $Re=80,000$



(b)  $Re=100,000$



(c)  $Re=120,000$



(d)  $Re=140,000$

Fig. 10. Streamlines and steady flow from  $r/R=0.80$  to  $r/R=1.0$  for various Reynolds numbers with a concentric expansion(a), (b), (c), (d).

### 3. 관마찰계수

유체가 유동관을 따라 흐를때 관벽에서의 마찰에 의한 마찰손실을 가져와 유체수송 동력을 증가시키는 원인이 되므로, 마찰계수는 중요한 의미를 지닌다.

Fig. 11은 공기유동이 시험관 중앙으로 급팽창될때  $Re=60,000\sim 120,000$ 에서 관마찰계수를 나타낸 것이다.

각각의 레이놀드수에 따른 관마찰계수의 평균치는 Moody(1944)선도에 매끄러운 관의 마찰계수와 비교하여 보면  $x/d=9$ 에서 관마찰계수값과 잘 일치하고 있다.

또한, 그림에서 보는바와 같이 관마찰계수는 레이놀드수가 증가함에 따라 전반적으로 그 값이 크게 나타났으며, 마찰계수는 전체적으로 관 입구영역에서 높게 나타났다가 유동이 완전히 발달한 영역에서 부터 서서히 감소함을 보여 주었다.

특히, 동일한 레이놀드수의 완전히 발달된 유동영역에서의 관마찰계수에 비하여 급팽창직면에서의 관마찰계수가 전체적으로 큰 값을 나타내고 있으며, 급팽창면에서 부터  $x/d=9$ 까지는 급하게 떨어지고 있다.

이러한 현상은 역시 급팽창으로 인하여 속도압이 급하게 떨어져 박리점에 이르기까지 재순환유동이 형성된 것으로 사료된다.

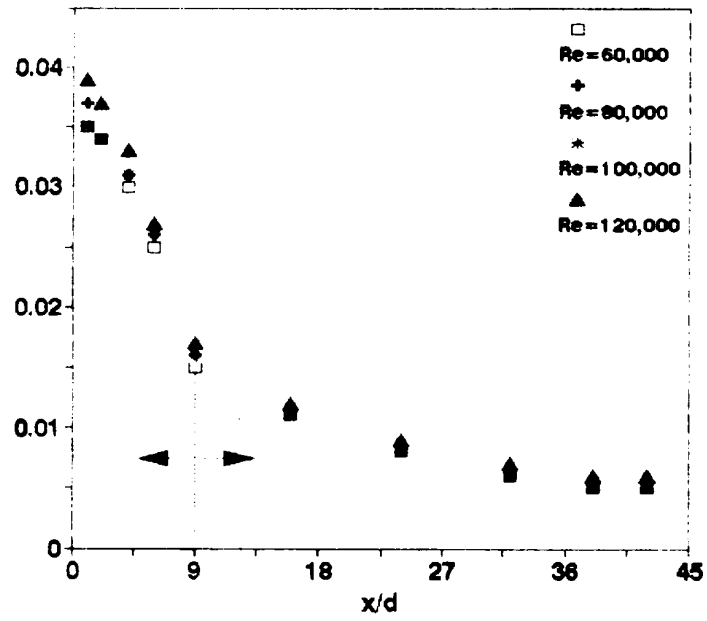


Fig. 11. Friction factors distribution for various Reynolds numbers with a concentric expansion.

#### 4. 체적온도와 관벽온도 및 열전달계수

Fig. 12(a), (b)는 Test tube를 따른 관벽온도와 체적온도를 나타내는 것이며, Fig. 12(a)에서의 관벽온도는 레이놀드수가 작을수록 모두 크게 높아졌으며, 전체적으로 초기에는 약간 증가하다가  $x/D=4\sim 9$  사이에서 급격히 감소하였으며  $x/d=9$ 이후부터 포물선형으로 증가하였다.

Fig. 12(b)는 Test tube을 따른 체적온도분포를 보여 주고 있는 그래프이며, 체적온도는 동일위치에서 레이놀드수가 작을수록 전반적으로 높게 나타났다. 또한,  $T_b$ 선도와 Fig. 12(a)의  $T_w$ 선도가 유형이 비슷하지만 관벽의 온도증가율이 체적온도의 상승폭보다 작아  $Nu/Nu_{DB}$ 의 값이  $x/d=4$  부근에서 최대값이 나타나고 있으며,  $x/d=24$ 이후 서서히 떨어졌다.

Fig. 13(a), (b)는 레이놀드수가 60,000과 80,000일때 각각의 체적온도를 축방향에 따라 온도분포를 나타낸 것이다.

체적온도는 관입구영역에서 증가하였다가 다시 서서히 감소하여  $x/d=4\sim 9$ 부근에서 최소치를 보이고 있다.

그리고, 다시 Test tube를 따라 거의 선형적으로 증가함을 나타내어 주고 있음을 알 수 있는데 이러한 분포도는 속도분포 그래프(Fig. 8, 9)에서 확인한 바와같이 급팽창하는 경우의 압력이 급격한 변동과 재순환유통의 형성으로 유체의 정상적인 열복사가 이루어지지 않았다고 사료된다.

그러나  $x/d=9$ 이후 부터는 일정하게 안정되어 속도변동이 작으므로 상대적으로 단위체적당 열복사 시간이 길어지고 열유속이 커지므로 온도가 상승된 것으로 사료된다.

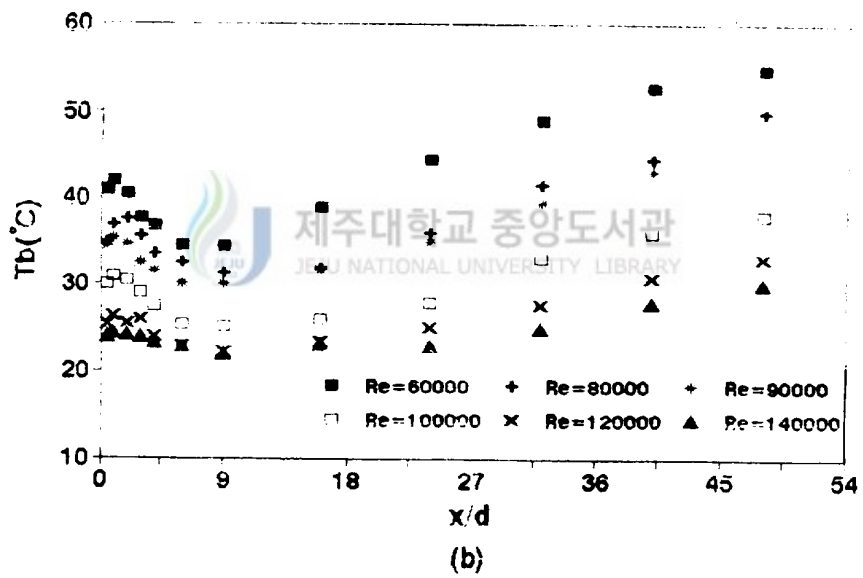
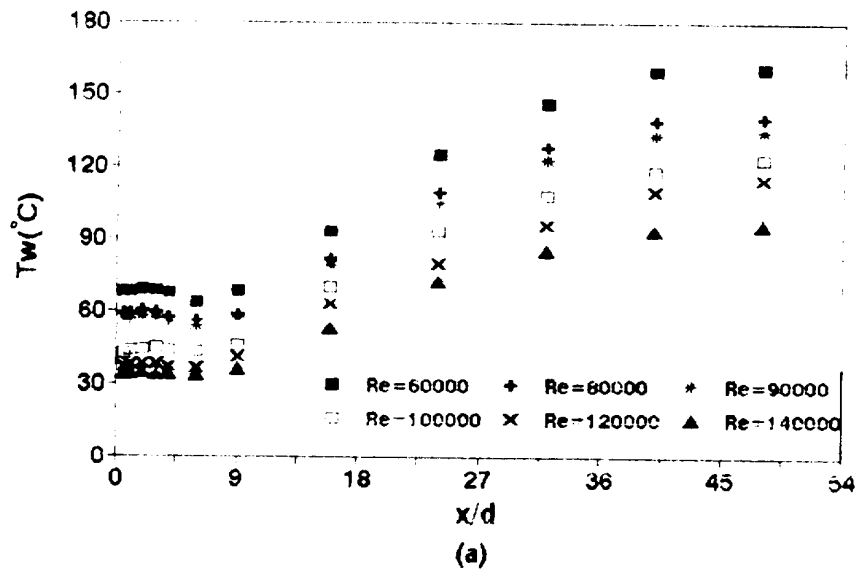
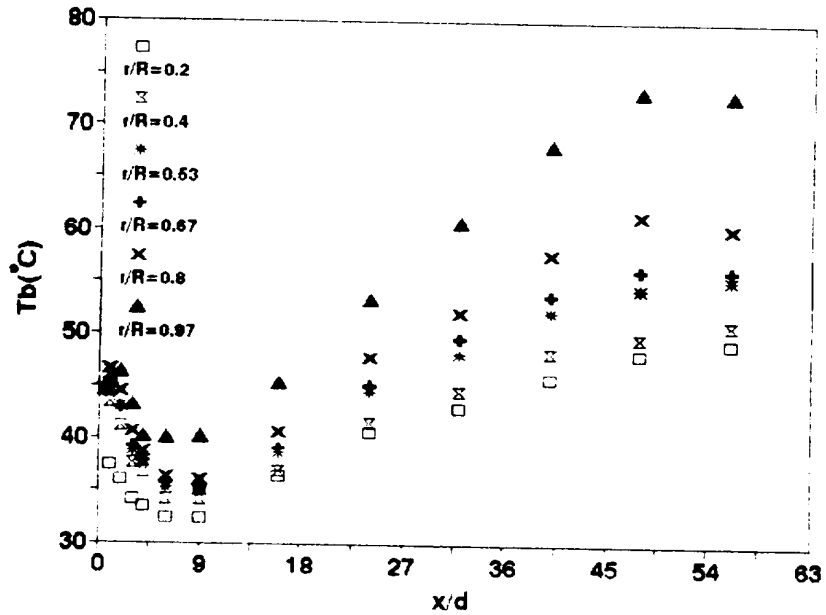
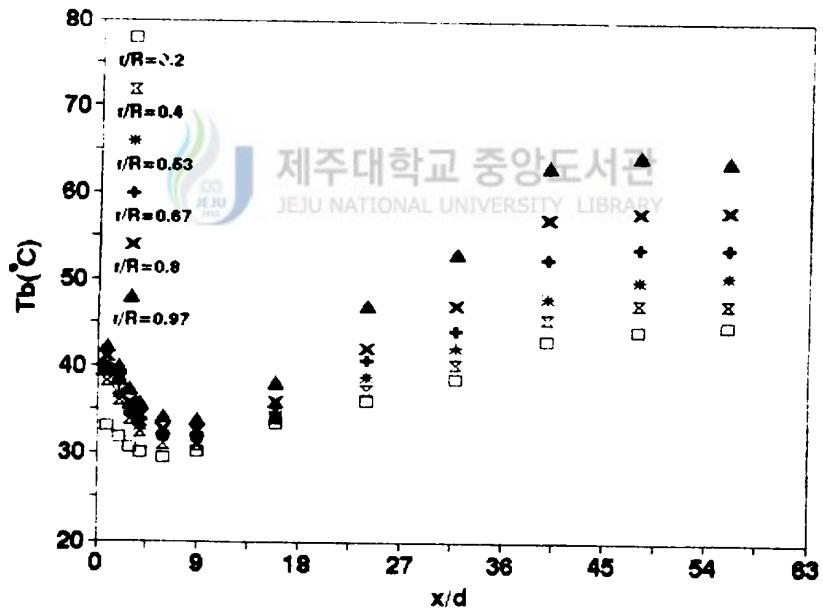


Fig. 12. Distribution of wall temperature and bulk temperature along the downstream for various Reynolds numbers.





(a)  $Re = 60,000$



(b)  $Re = 80,000$

Fig. 13. Distribution of bulk temperature along the downstream for various Reynolds numbers.

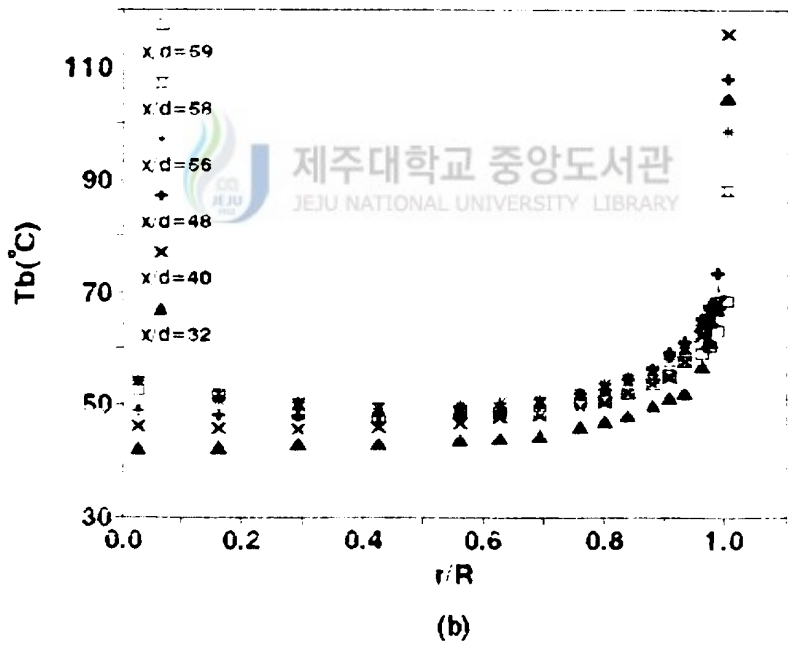
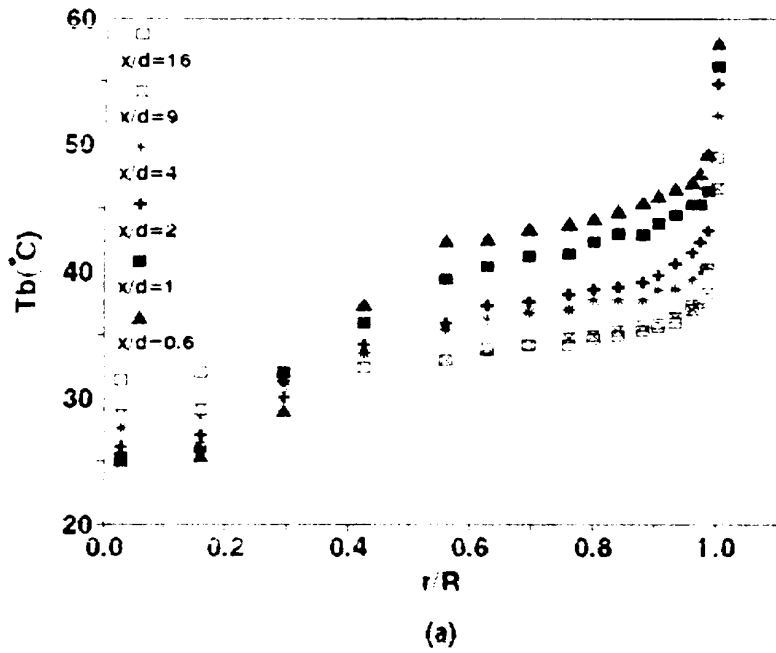
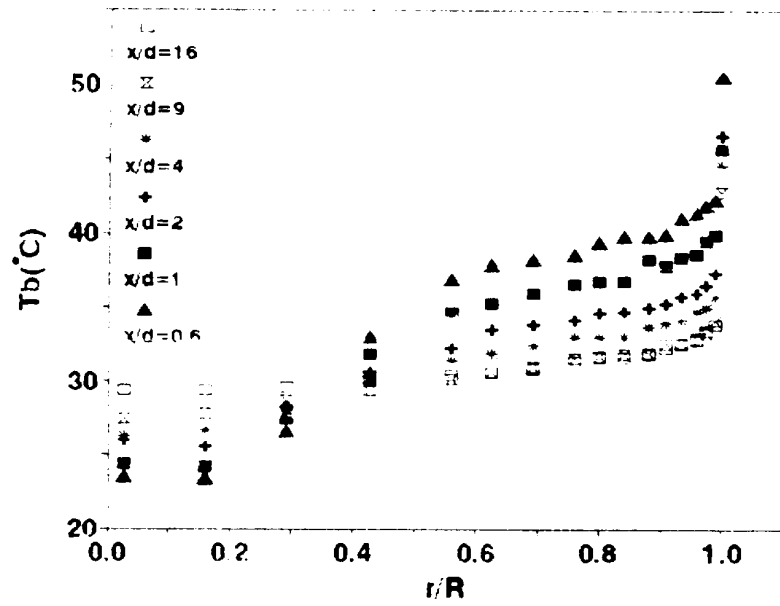
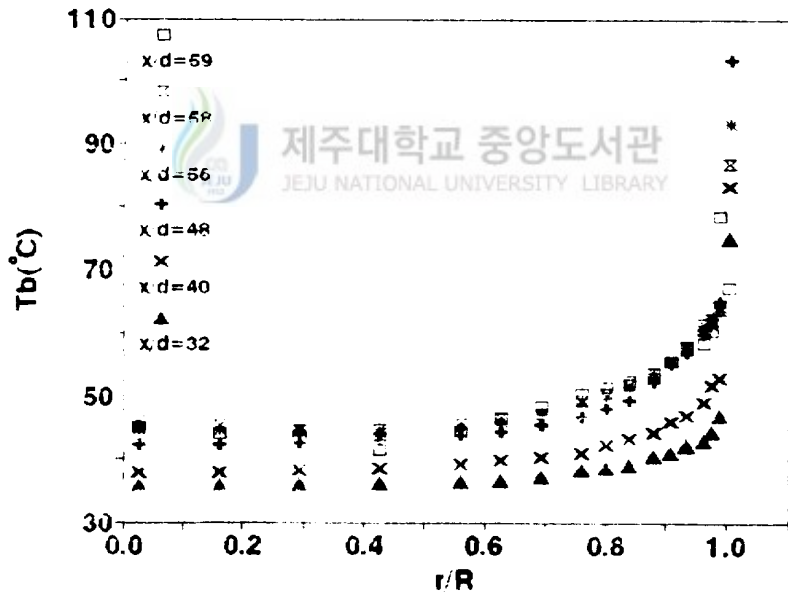


Fig. 14. Distribution of bulk temperature along the downstream for  $Re=60,000$ .



(a)



(b)

Fig. 15. Distribution of bulk temperature along the downstream for  $Re=80,000$ .

Fig. 13(a), (b)의 parameter를 다르게 하여 체적온도를  $r/R$ 에 대하여 분석하고 도시한 결과는 Fig. 14, 15이다.

Fig. 13, 14 (a), (b)에서  $x/d=9$ 이후부터는 체적온도가 서서히 안정되게 상승하고 있으나 관벽근처( $r/R=0.9$ 이상)에서 급상승하고 있으며, 관벽에서는  $Re=60,000$ 일때  $x/d=40$ 에서 최고치를 나타내고 있다.

그리고  $Re=80,000$ 일때는  $x/d=48$ 에서 최고치를 나타내고 있으므로 레이놀드수의 상승과 함께 최고온도는 downstream쪽으로 이동하고 있다.

또한, Fig. 14, 15에서 급팽창면에서 부터  $x/d=4$ 사이에서 관중심부근( $r/R=0.2$ 이하)에서 균일 했던 온도가  $r/R=0.3$ 을 지나면서 관벽에 이르기 까지 downstream쪽 보다 upstream측에 있는 유체가 더 빠르게 상승하고 있다. 이러한 현상은 급팽창으로 인한 유동구조의 급변화로 재순환유동이 형성된 것으로 여겨지며  $x/d=9$ 이후부터는 레이놀드수에 관계없이 안정된 온도선을 나타내고 있으므로 완전히 발달된 유동영역으로 사료된다.

Fig. 16은 시험관을 따른  $Nu/Nu_{DB}$ 수의 분포를 레이놀드수에 따라 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는바와 같이 Nusselt수는 각각의 레이놀드수에 대하여 관 입구에서 부터 시험관을 따라 축방향으로 측정하였는데 급팽창면에서 부터  $x/d=4$ 까지 급격히 증가하다가  $x/d=9$ 이후 부터 급격히 감소하고, 다시  $x/d=24$  이후 부터는 Nusselt수가 일정하여 완만하게 감소하였다.

이러한 현상도 재순환유동에 의한 재부착점 부근에서 열전달율이 최고치를 갖는 것을 고려하면 본 실험에서 최대 Nusselt수의 위치는  $Re=80,000$ 과  $100,000$ 일때  $x/d=4$ (4step heights)에서 나타났으므로 급팽창면에서 부터  $x/d=4$ 에 이르기까지 재순환유동이 발생한 것으로 여겨진다.

이를 Fig. 16에서 레이놀드수가 각각 16,730과 15,160 그리고 팽창비가 0.266 (Baughn et.al, 1984)인 실험치와 비교하여 보면 몇가지 차이점을 알 수 있다.

첫째 Nu수의 최대값의 위치는 8 step heights에서 나타났지만 본 실험에서는 4 step heights에서 나타나고 있다. 둘째  $Nu/Nu_{DB}$ 의 값은 비슷하게 나타나고 있는데 이러한 현상은 레이놀드수와 팽창비의 큰 차이에서 영향을 받은 것으로 여겨진다.

또한,  $Re=120,000$ 인 경우  $Nu_{max}$ 가 3 step heights에서 나타났는데 이를 분석하면 레이놀드수가 클수록  $Nu_{max}$ 는 작아지고 최고열전달의 위치는 upstream방향으로 이동하고 있으며, 또한, 레이놀드수가 동일할때 팽창이 작게 될수록 최고열전달계수의 위치는 downstream쪽으로 이동하고 있다.

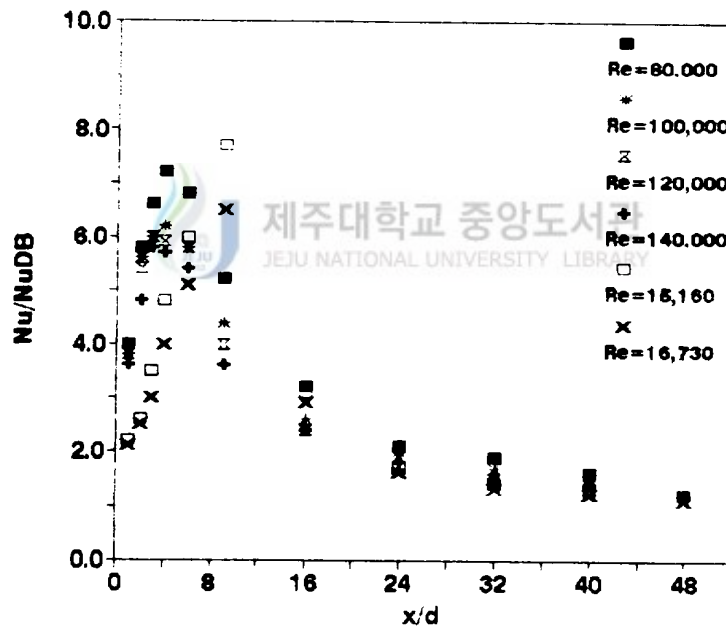


Fig. 16. Distribution of  $Nu/Nu_{DB}$  along the downstream for various Reynolds numbers with a concentric expansion.

## IV. 결 론

급팽창관에서의 공기의 유동이 시험관의 증상으로 유입팽창함과 동시에 유동장이 균일한 열유속을 갖는 경우의 난류유동을 조사한 결과 다음과 같은 실험결과를 얻었다.

- 1) 속도분포곡선에서  $x/d=4$ 이하에서  $r/R=0.03\sim 0.4$ 까지는 Re수에 관계없이 부(-)의 값을 가지므로 유동방향이 반대임을 알 수 있으며,  $x/d=4$ 의 부근에서 재순환유동이 강하게 일어나고 있음을 알 수 있다.
- 2) 증상으로 유입팽창시에 레이놀드수가 80,000과 100,000일 경우 최대 열전달계수가 나타나는 위치는 모두 4 step heights에서 나타났으며 레이놀드수가 120,000과 140,000일때  $Nu/Nu_{DB}$ 는 3 step heights에서 나타났다.
- 3) 급팽창된 downstream에서 체적온도가 가장 높은 곳은 레이놀드수의 증가에 따라 downstream방향으로 이동하며 팽창면으로 부터  $x/d=4$ 사이에서는  $r/R=0.3$ 보다 클때 upstream쪽 온도가 더 빠르게 상승한다.
- 4) 축방향속도는  $r/R=0.6$ 이후 관중심에 이르기까지 급격히 증대하였으며  $Re=60,000\sim 140,000$ ,  $d/D=0.33$ 일때,  $r/R=0.03\sim 0.33$ 사이에서 레이놀드수에 관계없이  $x/d=4$ 이하 upstream부분에서 재순환유동을 확인하였으며,  $x/d=9$ 이후에는 완전발달된 유동영역으로 안정화 되었다.

5) 관마찰계수는 입구 유동조건에 관계없이 관입구 근처에서 최대값을 보이다가  $x/d=9$ 에 이르기까지 마찰계수는 빠르게 감소하였으나  $x/d=13$  이상에서 완만하게 감소함을 나타내 주고 있다.

6) 급팽창된 downstream test section에서의 체적온도와 관벽온도는  $x/d=6\sim 9$ 에서 모두 최소치가 되었으며, 그 이후부터는 선형적으로 증가하였다.

## V. 참고문헌

- Back, L. H. and E. J. Roschke, 1972, "Shear-Layer Flow Regimes and Wave Instabilities and Reattachment Lengths Downstream of an Abrupt Circular Channel." ASME Trans., Journal Applied Mechanics, 677-688.
- 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.
- Casey, M. R. and B. Sc, 1988, "An Experimental and Numerical Investigation of Three-Dimensional Turbulent Flow with Decaying Swirl." University College of Swansea, the Degree of Master of Science.
- Chedaille, J., W. Leuckel and A. K. Chesters, 1966, "Aerodynamic Studies carried out on Turbulent Jets by the International Flame Research Foundation." ASME Trans., Journal of the Institute of Fuel, 506-521.
- Chigier, N. A. and J. M. Beer, 1964, "The Flow Region Near the Nozzle in Double Concentric Jets." ASME Trans., Journal of Basic Engineering, 797-804.
- Cimbala, J. M. and W. J. Park, 1990, "An Experimental Investigation Of the Turbulent Structure in a Two-Dimensional Momentumless Wake." 제주대학교 산업기술연구보고 제1권, 479-509.



- 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.
- Ede, A. J. 1959, "Effect of an Abrupt Disturbance of the Flow on the Local Heat Transfer Coefficient in a Pipe." HEAT 164, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, Scotland.
- Ede, A. J., C. I. Hislop and R. Morris, 1956, "Effect on the Local Heat Transfer Coefficient in a Pipe of an Abrupt Disturbance of the Fluid Flow : Abrupt Convergence and Divergence of Diameter Ratio 2:1." *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, London, Vol. 170, 1113-1126.
- Emerson, W. H. 1966, "Heat Transfer in a Duct in Regions of Separated Flow." *Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference AICHE*, Vol. 1, 267-275.
- Filetti, E. G. and W. M. Kays, 1967, "Heat Transfer in Separated, Reattached and Redevelopment Regions Behind a Double Step at Entrances to a Flat Duct." ASME Trans., Journal of Heat Transfer, Series C, Vol. 89(2), 163-168.
- Gao, G. and H. Ning, 1986, "A New Theory for Solving Turbulent Vortices in Flowing Fluids." ASME Trans., Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 108, 259-264.
- Goldstein, R. J. et al. 1970, "Laminar Separation, Reattachment and Transition of the Flow Over a Downstream-Facing Step." ASME Trans., Journal of Basic Engineering, Series D, Vol. 92(4), 732-741.

- Gooray, A. M., C. B. Watkins and W. Aung, 1985, "Turbulent Heat Transfer Computations for Rearward-Facing Steps and Sudden Pipe Expansions," ASME Trans., J. of Heat Transfer, Vol. 107, 70.
- Johson, R. W. and B. E. Launder, 1982, Discussion of 'On the Calculation of Turbulent Heat Transport Downstream from an Abrupt Pipe Expansion,' Numerical Heat Transfer, Vol. 5, 493.
- Habib, M. A. and D. M. McEligot, 1982, "Turbulent Heat Transfer in a Swirl Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion." *Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Washington, D.C, 159-165.
- 김동식, 한용운, 1992, "Study over Turbulent Characteristics of the Sudden Expansion Nozzle Flow with Variations of the Expansion Ratio." 대한기계학회 '92년도 추계학술대회 논문집(II), 164-167.
- 권기린, 이상배, 장태현 등, 1993, "An Experimental Study Of the Swirl Flow and Heat Transfer Downstream an Abrupt Expansion in a Circular Pipe with Uniform Heat Flux." 대한기계학회 '93년도 추계학술대회 논문집(II), 211-215.
- 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.
- 이용주, 김광용, 조용철, 1992, "Prediction of Turbulent Heat Transfer Downstream of a Sudden Axisymmetric Expansion." *Proceeding of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference*, 1' 53-58.
- Moon, L. F. and G. Rudinger, 1977, "Velocity distribution in an Abruptly

- Expanding Circular Duct." Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, 226-230.
- Mueller, T. J. and R. A. O'Leary, 1970, "Physical and Numerical Experiments in Laminar Incompressible Separating and Reattaching Flows." AIAA paper No. 70-703.
- Nakanishi, S., M. Sakurai and H. Osaka, 1992, "Numerical Study on Two-Dimensional Expansion Channel Flow-Asymmetric Flow." *Proceeding of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference*, 1' 59-62.
- Ota, T. and T. Hata, 1992, "Numerical analysis of Laminar Heat Transfer and Flow in a Plane Enlarged Channel." *Proceeding of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference*, 1' 63-68.
- Symyth, R. 1979, "Turbulent Flow over a Plane Symmetric Sudden Expansion." ASME Trans., J. of Fluids Eng., Vol. 101, 348-353.
- Sparrow, E. M. and A. Chaboki, 1984, "Swirl-Affected Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular tube." Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer Vol. 106, 766-773.
- Sparrow, E. M. and R. G. Kermink, 1979, "Heat Transfer Downstream of a Fluid withdrawal Branch in a Tube." ASME Trans. Journal of Heat Transfer, Vol. 101, 23-28.
- Stevenson, W. H. and Tomson, H. D. et al., 1972, "The Use of the Laser-Doppler Velocimeter for Flow Measurements." Purdue University, Workshop, Project SQUID.

- 
- Syred, N., J. M. Beer and N. A. Chigier, 1971, "Turbulence Measurement in Recirculating Flows. " Institute of Mechanical Engineering, London, B27-B36.
- Zemanick, P. P. and R. S. Dougall, 1970, "Local Heat Transfer Downstream of Abrupt Circular Channel Expansion." ASME Trans., J. of Heat Transfer, Vol. 92(1), 53-60.
- Zhao, Y. H., W. M. Li and J. S. Chin, 1986, "Experimental and Analytical Investigation on the Variation of Spray Characteristics Along Radial Distance Downstream of a Pressure Swirl Atomizer." ASME Trans., Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 108, 473-478.



## 謝 辭

本 論文이 이루어지까지 激勵하여 주시고 誠心으로 指導하여 주신 權獻麟 教授님에게 먼저 感謝를 드리며, 항상 指導鞭撻을 해주시고 論文校閱에도 힘써 주신 金貴植 教授님, 그리고 항상 關心을 갖고 激勵를 해주고 實驗을 할 수 있도록 도와 주신 許鍾哲 教授님과 金萬守 教授님, 學文에 精進할수 있도록 配慮를 해주신 高長權 教授님과 玄明澤 教授님에게 眞心으로 感謝를 드립니다.

또한, 實驗裝置를 製作하는데 도움을 주신 大學生들에게도 感謝를 드리며, 實驗結果를 얻기까지 激勵를 해주신 園藝學科 文斗吉 教授님, 農業經濟學科 姜東一 教授님, 圖文學科 文聖淑 教授님에게 感謝를 드립니다.

끝으로 이 論文이 있기까지 변함없는 關心과 사랑으로 보살피 주신 父母님과 丈母님에게 깊은 感謝의 마음을 전하며, 아울러 어려운 與件에도 獻身的으로 內助하며 激勵해준 아내 順五 그리고 아들 京周와 이 기쁨을 나누고 싶습니다.