

## 急擴大管內에서 亂流旋回流動의 熱傳達에 관한 研究<sup>+</sup>

권 기 린\* · 허 중 철\*\*

(96년 5월 22일 접수)

An Experimental Study of the Turbulent Swirling Flow and Heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Pipe with Uniform Heat Flux

Ki-Rin. Kwon\* · Jong-Chul Huh\*\*

**Key Words** : Swirl Generator(선회 발생기), Swirl Chamber(와류실), Step Height(스텝높이), Wall Temperature(벽면온도), Bulk Temperature(체적온도), Recirculating Zone(재순환영역), Reattachment Length(재부착길이)

### Abstract

Many studies of heat transfer on the swirling flow or unswirled flow in a abrupt pipe expansion are widely carried out. The mechanism is not fully found evidently due to the instabilities of flow in a sudden change of the shape and appearance of turbulent shear layers in a recirculation region and secondary vortex near the corner.

The purpose of this study is to obtain data through an experimental study of the swirling flow and heat transfer downstream of an abrupt expansion in a circular pipe with uniform heat flux.

Experiments were carried out for the turbulent flow and heat transfer downstream of an abrupt circular pipe expansion. The uniform heat flux condition was imposed to the downstream of the abrupt expansion by using an electrically heated pipe. Experimental data are presented for local heat transfer rates and local axial velocities in the tube downstream of an abrupt 3:1 & 2:1 expansion.

Air was used as the working fluid. In the upstream tube, the Reynolds number was varied from 60,000 to 120,000 and the swirl number range (based on the swirl chamber geometry, i.e.  $L/d$  ratio) in which the experiments were conducted were  $L/d=0, 8$  and  $16$ .

Axial velocity increased rapidly at  $r/R=0.35$  in the abrupt concentric expansion turbulent flow through the test tube in unswirled flow. It showed that with increasing axial distance the highest axial velocities move toward the tube wall in the case of the swirling flow

+ 본연구는 1995년도 교육부 학술연구 조성비(ME 95-A-08)에 의하여 연구되었음.

\* 제주대학교 기계공학과 교수

\*\* 제주대학교 기계공학과 부교수

abrupt expansion.

A uniform wall heat flux boundary condition was employed, which resulted in wall-to-bulk temperatures ranging from 24 °C to 71 °C. In swirling flow, the wall temperature showed a greater increase at L/d=16 than any other L/d. The bulk temperature showed a minimum value at the pipe inlet, it also exhibited a linear increase with axial distance along the pipe.

As swirl intensity increased, the location of peak Nu numbers was observed to shift from 4 to 1 step heights downstream of the expansion.

This upstream movement of the maximum Nusselt number was accompanied by an increase in its magnitude from 2.2 to 8.8 times larger than fully developed tube flow values.

## 1. 서 론

급확대를 통한 난류 선회 유동은 몇 가지 뚜렷하게 상이한 유동형태를 가지고 있고, 1개이든지 2개의 재순환 영역을 가지며, 난류의 정도가 상당히 높고, 몇 가지 조건하에서 주기적인 비대칭을 갖는 복잡한 흐름이다. 그러나, 이들의 응용은 또한 화염안정을 위한 흐름 재순환영역의 이점을 갖고 있고, 연소효율 증진을 위한 높은 혼합율의 이점도 갖고 있으며, 열전달의 부수적인 상승효과도 갖고 있으므로, 보다 세밀한 유동장 및 열전달율을 조사하고, 아울러 각종 열 이용기기 응용 분야에 활용을 도모해야 함은 필수적이라 여겨진다.

1948년 Boelter 등<sup>1)</sup>은 관로내에 있어서, 박리되고 재부착된 유동에서의 공기의 열전달계수에 관한 실험적 연구 결과, 재부착점 부근에서의 최대 열전달계수는 충분히 발달된 유동에서의 값의 약 4배임을 보고한바 있다.

그 이후에 급확대되는 원관내 유동에서는 박리로 인한 난류 운동에너지의 증가로 완전 발달된 원관내 유동에 비해 관내 입구 영역에서, 특히 재부착 영역에 최고 열전달계수가 아주 큰 비율로 증가된다고 알려져 왔다<sup>2)~6)</sup>.

한편, 에너지 과동 이후 에너지의 효율적 이용에 대한 강조가 날로 높아지면서 선회류가 연소 시스템에서 고부하 안정연소를 할 수 있다는 점과 열교환기 등에서 급팽창의 효과와 마찬가지로 열전달 계수를 크게 증가시킬 수 있다는 점 때문에, 이 분야에 대한 연구<sup>7)~11)</sup>도 활발히 진행되어 오고 있다.

특히, 선회 유동은 접선 방향 속도에 대한 유선의 길이가 비선회유동보다 길므로, 가열된 관벽 근처에서 유체의 입자가 더 많은 에너지를 받아들일 수 있는 특성으로 인하여, 각종 열교환기, 가스터어빈 날개의 냉각, 산염용 노의 연소실 그리고 내연기관 연소실 등에 이용되고 있다.

따라서 이러한 급확대 관내의 선회류를 이용한 유동은 일반적인 수평관로 유동보다 극히 큰 난류강도와 혼합율을 갖는 특징을 갖음으로써 열전달율을 증진시킨다. 이러한 상승된 열전달율은 역시 열교환기나, 가스터어빈 엔진의 덤프 연소기, 고체연료 램 제트 연소기와 같은 장치에서 이러한 유동형태를 이용하게 된 중요한 동기가 된 것이다.

Table 1은 최근에 이르기까지 급확대관 또는 선회류 이용하에서의 실험조건에 따른 열전달조사를 일부 요약한 것이다.

이와 같은 연유와 연관성에 입각하여, 최근에 Dellenback 등<sup>12)</sup>, Habib와 McEligot<sup>13)</sup> 그리고 Sultanian<sup>14)</sup>는 급팽창을 통한 선회유동에 대하여 유동장의 조사와 함께 열전달 거동을 수치 해석적 또는 실험적으로 연구 보고한 바도 있다.

그러나, 이제까지 급확대관 또는 선회류를 이용한 열전달에 관한 연구가 많았음에도 불구하고, 급확대관내에서 선회와 관련된 유동장 및 열전달 조사는 극히 제한적인 뿐이다. 그러한 이유는 실제 공학적으로 많이 사용되고 있는 급확대관은 형상의 급변화에 의한 유동의 불안정, 재순환영역의 형성으로 인한 난류전단층의 발생, 코너 에디 부근에서의 제2와류의 발생 등, 그 유동구조가 극히 복잡

하고 난해한 관계로 그의 유동장 및 열전달 메카니즘의 상세함을 명확히 규명하기 어렵기 때문이다.

따라서 본 연구에서의 급확대 선회유동은 연구를 위한 기초적인 유동을 제공하고, 이의 정확한

이해를 함으로써, 결과적으로 열전달분야와 공학적 응용분야에서 보다 높은 각종 열기기의 설계와 연소 현상 해석에 유익한 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 1. Summary of Heat Transfer in Sudden Expansion Experiments

Investigator	Media (Pr)	D/d	Re no. (Ud/ν)	Nu <sub>m</sub>	$\frac{X}{H_{Num}}$	$\frac{Nu_m}{Nu_{fd}}$	비고
Ede, Hislop, & Morris (1956)	Water (9.4)	.5	25,000	310	8.4	3.5	Nu <sub>m</sub> : 약 3배 upstream pipe 가열
			48,000	430		2.9	
			90,000	670		2.7	
Ede, Morris & Birtch (1962)	Water (6.0)	.8	12,500	185	10.0	2.5	various expansion ratio. Nu <sub>m</sub> : 10h, 8.4h 9.4h에서 나타남
			25,000	290		2.2	
			62,500	510		1.9	
		.5	20,000	300	8.4	4.0	
			40,000	490		2.2	
			100,000	920		2.0	
.3	33,000	470	9.4	6.3			
	66,700	860		6.6			
	176,000	1700		6.3			
Emerson (1966)	air (0.7)	.58	25,000	105	14.0	2.5	Nu <sub>m</sub> : 10.8h~14.0h reattachment zone : 9.5h
			57,000	180	13.4	2.2	
			63,000	270	13.4	2.4	
			182,000	440	10.8	2.1	
Krall & Sparrow (1966)	water (6.0)	.5	31,600	400	≈7	4.7	Nu <sub>m</sub> =0.398Red <sup>2/3</sup> Nu/Nu <sub>fd</sub> ; a strong fuction of Re.
			50,400	540		4.2	
			100,200	860		3.7	
			200,000	1360		3.0	
Zemanick & Dougall (1970)	air (0.7)	.54	38,200	206	8.0	3.5	Nu <sub>m</sub> =0.20Red <sup>2/3</sup> Nu/Nu <sub>fd</sub> ; a weak fuction of Re.
			89,100	446	6.5	3.8	
			123,000	576	5.3	3.9	
Baughn, Hoffman, Takahashi & Launder (1984)	air (0.7)	.53	22,000	126	11.0	3.7	Corner eddy 측, 0~3h에서의 열전달조사. 약 1h에서 Nu <sub>min</sub> 이 발생
			39,000	190	11.0	3.5	
			80,000	317	10.0	3.3	
			136,000	440	10.0	3.0	
Sparrow & Chaboki (1984)	air (0.7)	1	9,000			3.4	various swirl strength. thermal entrance region에서 Nu <sub>max</sub>
			16,500			3.5	
			26,500			3.6	
			43,500			3.7	
Dellenback, Metzger & Neitzel (1987)	water (6.0)	.5	30,800	1130	1.5	9.5	various swirl strength, Nu <sub>m</sub> ; a strong fuction of swirl
			60,800	1540	1.4	8.0	
			99,800	1970	1.4	7.1	

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 선회유동 발생장치

선회유동을 발생시키기 위하여 본연구에서는 접선방향 입구조건(tangential inlet condition)으로 선회유동을 발생시키는 방법을 사용하였다. 선회발생기의 구조는 Fig. 1에 나타내었으며 내경  $\phi$  140 mm 아크릴 원통관의 측면에 원주방향으로  $\phi$  3.2 mm 구멍을 길이방향으로 28개 가공하고 원주방향  $45^\circ$  간격으로 동일하게 작업하였다.

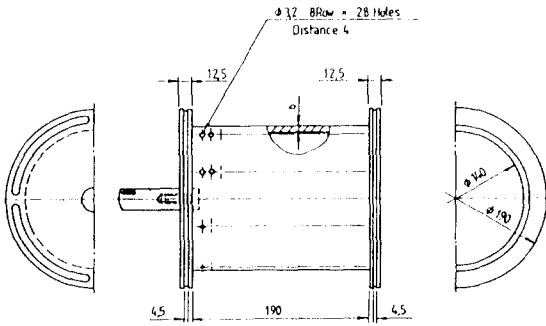


Fig. 1 Swirl generator arrangement

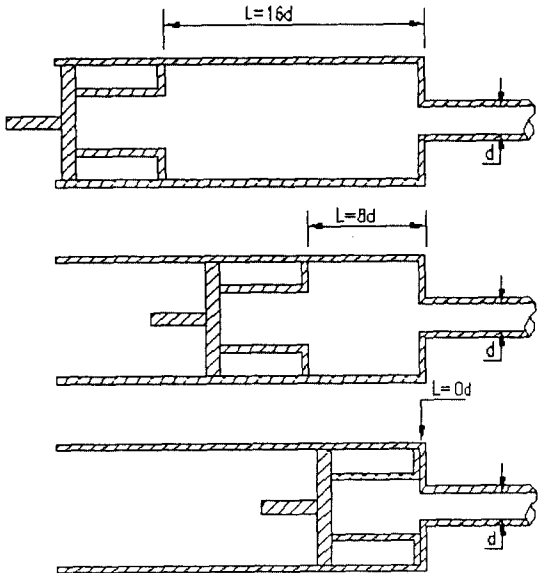


Fig. 2 Position of the swirl generator in the chamber

선회발생기 외부표면의 구멍은 전부 224개이며 구멍의 중심과 중심사이의 거리는 4mm이다. 선회발생기가 들어가는 와류실의 구조는 선회강도의 조절이 가능하도록 Fig. 2와 같이 선회발생기를 축방향으로 이동할 수 있도록 설계하였다.

와류실내의 선회발생기에서의 유동경로는 Fig. 3에서 처럼 단면 A-A의 가장자리로 공기가 흡입되어 측면의 구멍으로 유입되면서 선회유동이 발생되어 시험관으로 흘러 들어간다. 이때 A-A면에 의해 선회의 균형이 이루어지고 와류실의 길이 L과 와류실의 내경 d의 비(L/d)에 의해 선회유동의 강도(swirl number)가 결정되어 진다.

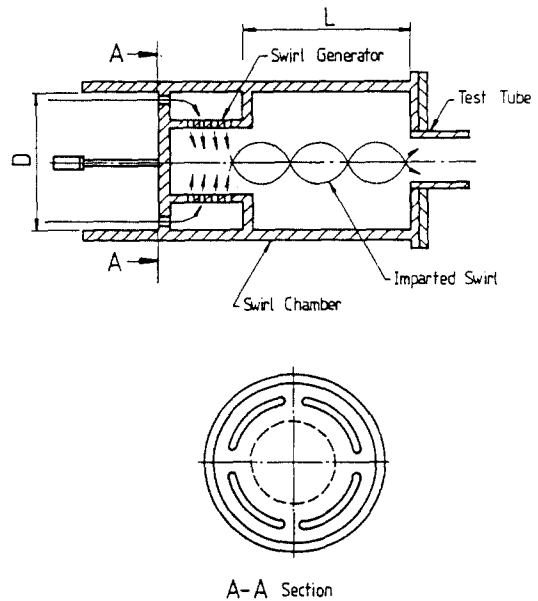


Fig. 3 Schematic diagram of the inlet section

#### 2.1.2 유체실험장치

Fig. 4는 본 연구에 사용한 유체실험장치의 전체적인 개략도이다.

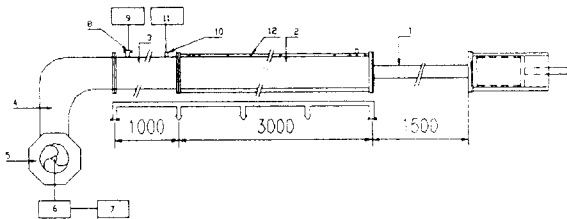
유체실험에 사용한 시험관은 내경이 150mm, 두께가 5mm, 길이가 2000mm인 투명 아크릴관을 사용 제작하였고, 시험관 출구부분에는  $\phi$  150mm  $\times$  L1000mm인 원형추출관을 부착하고 내

부에 멀티 피토판을 설치하여 마노메타와 연결함으로써 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 주철관 내부에는 허니컴을 설치하여 유동을 균일하게 하였으며 시험관과는 플랜지를 이용하여 4개의 보울트로 연결되며 송풍기와는 고무호스(flexible connector)로 연결하였다.

송풍기는 동력 10 HP, 최대회전수 3400 rpm을 가지며 유입공기의 예열을 방지하기 위하여 흡입식으로 설치하였다. 공기유량의 변화는 RPM 조절기에서 구동모터의 회전수를 조절함으로써 얻었다.

송풍기의 소음과 진동을 줄이기 위해 방진판을 송풍기 바닥에 깔았고 배출된 공기는 실험에 영향을 미치지 않도록 송풍기 배출부에 고무호스를 연결하여 실험실 외부로 배출하였다.

관벽의 압력과 유속을 측정하기 위해서 측면과 윗면에 구멍을 뚫고, 측면에는  $\phi 7\text{mm} \times \text{L}30\text{mm}$ 의 동관을 설치하였다.



- 1) Acryle tube ( $\phi 50\text{m}$ )
- 2) Acryle tube ( $\phi 150\text{m}$ )
- 3) Steel pipe ( $\phi 150\text{mm}$ )
- 4) Flexible connector
- 5) Turbo fan (220V  $\times$  10HP)
- 6) Motor (220V  $\times$  10HP)
- 7) R. P. M regulator
- 8) Multi pitot tube (Torbar 301)
- 9) Inclined manometer
- 10) Pitot tube
- 11) Electronic Manometer
- 12) Measurement hole ( $\phi 2.5\text{mm}$ )

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus for isothermal flow

2.1.3 열전달 실험장치

Fig. 5는 열전달 실험에 사용된 실험장치의 개략도이고 <Photo. 1>은 시험관에 열선을 감은 형태를 나타낸 사진이다.

열전달 실험에 사용한 시험관은 내경이 150mm, 두께가 5mm, 길이가 3000mm인 동을 재료로 하여

제작하였고, 이 시험관에 균일가열(uniform heating)을 가하기 위하여 가열코일을 균일한 간격으로 감고, 관벽온도및 시험관 내부를 흐르는 유체의 온도를 측정하기 위하여 K형 열전대를 설치하고, 전자식 온도계에 연결하였다.

시험관에서 발생하는 높은 열이 후류로 갈수록 상승되므로 시험관의 끝부분과 강철관의 연결 플랜지는 테프론을 사용하여 내열성을 추구하였다.

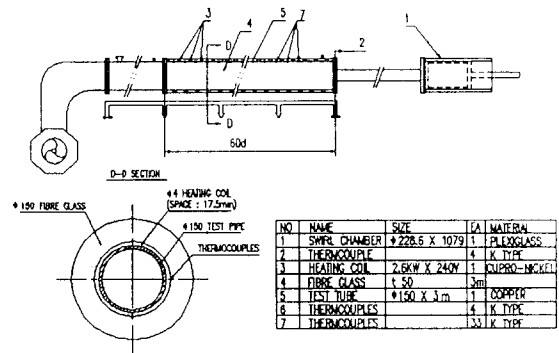


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus for heat transfer

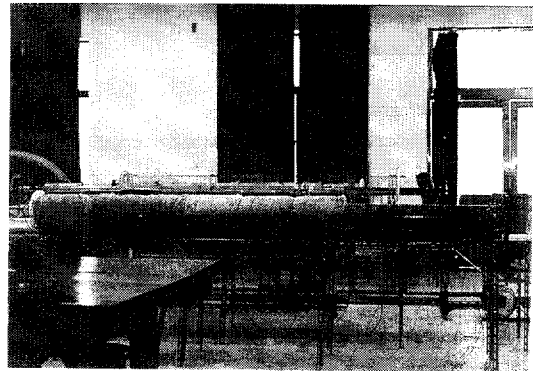


Photo. 1 Photograph of the test tube mounted with heating coil

열전대는 적응성이 양호한 K-type(Chromel Alumel)을 선택하여 길이를 같게 잘라 끝부분을

용접하여 가공하였다. 열전대의 보정은 우선 전압계(Volt-meter)를 사용하여 전압이 거의 일정하게 나타나는가를 확인하였고, 시험관에 열전대를 전부 부착한 후에 이를 온도기록계(Hybrid Recorder : HR2500)에 연결하여 온도 데이터가 프린트 되도록 하였다.

열전대는 보정을 거친후 관벽을 깨끗이 닦고 내열 테이프를 부착하여 관벽으로 부터 이탈을 방지하였다.

시험관내 유동장에서의 체적온도(bulk temperature)를 얻기 위하여 선택한 단면은 벽면온도를 측정할 위치와 같은 지점을 선택하였다. 시험관 전체에 흐르는 전류는 7.5A, 전압은 240V로 가열량은 1.75 kW이다. 시험관의 외부로 방출되는 열량을 최소화하기 위하여 관의 외부에는 두께 30 mm의 유리섬유(glass wool)로 덮고 다시 비닐테이프로 감았다.

또한 팽창 시험을 위해 사용된 upstream tube는 내경이 50mm와 75mm, 두께가 5mm, 길이가 1500mm인 투명 아크릴 관이 사용되었다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 유체유동 실험방법

시험관 끝부분에 멀티피토크관(multi-pitot tube : TORBAR 301)을 설치하고 피토크관을 이용하여 보정곡선(calibration curve)을 구하였다. 멀티피토크관은 평균유속의 측정에 사용되며 압력과 유량에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$DP = \left[ \frac{Q}{K \cdot A \cdot \sqrt{\rho \cdot 1.451}} \right]^2 \quad (1)$$

여기서 DP는 멀티피토크관 출구압력, Q는 유량, K는 Torbar계수를 나타내고 있다.

Fig. 6은 비선회유동의 경우이고, Fig. 7은 선회유동의 경우 보정곡선을 나타낸 것이다. 여기서 Re수의 평균속도 값이 압력으로 환산되므로 이를 이용해 송풍기 회전수를 조절하여 마노메타에서 압력값으로 맞추면 필요한 Re수를 구할 수 있다. Re수가  $6 \times 10^1$ ,  $8 \times 10^1$ 의 경우에 입구

에서의 비선회유동, 강선회유동(L/d=0), 중간선회유동(L/d=8), 약선회유동(L/d=16)의 변화로 전부 16회 조건으로 유체유동에 관한 실험을 행하였으며 실험조건을 <Table 2>에 나타내었다.

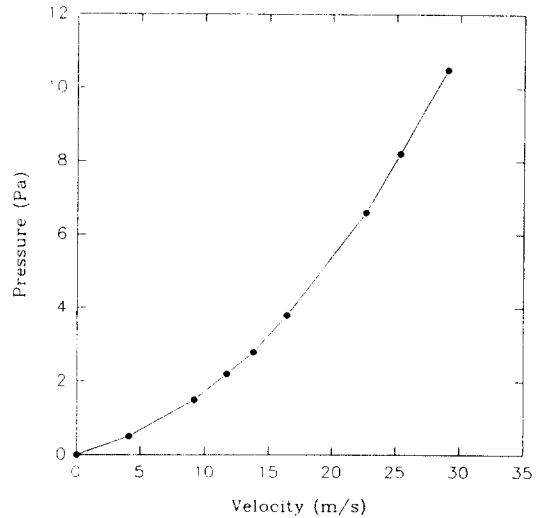


Fig. 6 Multi-manometer calibration curve for non swirling flow

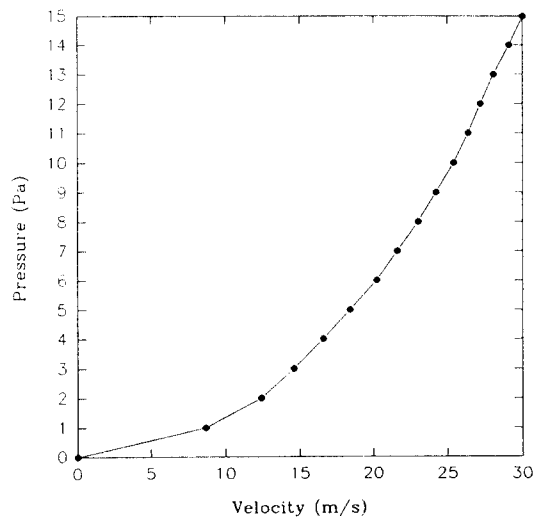


Fig. 7 Multi-manometer calibration curve for swirling flow

Table 2. Experimental conditions

Flow	Flow type	Reynolds number	Remarks
1 2	Unswirled	60,000 80,000	Straight pipe
3 4	High Swirl	60,000 80,000	Swirl chamber length $L/d=0$
5 6	Intermediate Swirl	60,000 80,000	Swirl chamber length $L/d=8$
7 8	Low Swirl	60,000 80,000	Swirl chamber length $L/d=16$

### 2.2.2 열전달 실험방법

시험관 전체에 AC전원 ( $7.5A \times 240V = 1.75$  kW)을 가하여 균일한 열유속을 이루고 Re수와 유동의 조건은 유체유동실험의 경우와 마찬가지로 하였다.

시험관내에 균일 열유속을 이루는 방법은 먼저 송풍기를 구동하여 필요한 Re 수에 맞춘 다음 전압조정기에서 조정된 전류가 열선에 흐르게 하여 열량으로 변환시킨다. 이때 열선의 저항에 의하여 발생하는 열량은 다음과 같다.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2)$$

직접가열을 30분 정도로 하면 시험관내에는 균일열유속이 이루어지고 이후 체적온도 측정을 하는데 시험관내에서 열전대 프로브의 이송은 이송장치(traverse mechanism)을 이용하였다. 열전대 프로브는 시험관 단면상에서 윗면에 있는 안내홀을 통하여 삽입하고 관아래 벽면에서부터 위로 이송하면서 측정하였고 이 온도들로 부터 계산되었다. 측정을 하지 않는 안내홀은 고무마개로 막아 열량손실과 유동손실을 방지하였다.

체적온도의 측정에 장시간이 소요되므로 벽면온도는 실험의 시작시, 중간과 종료시에서 각각의 측정 point를 온도기록계로 동시에 측정 기록하고 그 3회의 평균값을 취하였다. 측정값은 온도기록계 자

체의 프린터기에서 기록되며 일회 측정에 10초 정도 소요되므로 시간의 경과에 따른 관벽면의 온도 편차 요인을 제거할 수 있었다. 이때 3회의 데이터는 표준편차에 대한 오차가 3%이내 이며 그 이상이 되면 값을 취하지 않았다.

측정 계산한 유체의 체적온도( $T_b$ )와 벽면온도( $T_w$ )로 부터 열유속( $dq$ )을 구하였으며 두 측정점간의 대류 열전달계수( $h$ )를 다음 식으로 구하였다.

$$T_b = \frac{\int_0^{r_0} \rho 2\pi r dr u c_p T}{\int_0^{r_0} \rho 2\pi r dr u c_p} \quad (3)$$

$$dq = \dot{m} C_p dT_b \quad (4)$$

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

이 대류 열전달계수  $h$ 와 체적온도( $T_b$ )에 따른 열전도율을 찾아, 다음 식에 대입하여 Nusselt수를 구하였다.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

이 식으로부터 축방향의 각 위치에서 Nu수를 구하고 Dittus-Boelter식에서 얻은 결과와 비교하였다. 또한 본 연구는 급확대관내에서 난류선회유동의 열전달에 관한 연구이므로 확대비가 2인 경우에 대하여도 열전달실험을 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유동장에서의 실험결과 및 고찰

#### 3.1.1 축방향 속도 분포

Fig. 8는 비선회유동일때, Re수가 80000일때의 공기의 유동을 시험관의 중앙으로 유입 팽창시킨 상태하에서의 축방향속도를 피토투관으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 급확대로 인한 유동영역의 갑작스런 증가로 인해 재순환 영역이 나타났으며, 관입구 부근에서 대단히 큰 속도 구배가 일어났으며, 이것은 박리로 인해 강한 전단 경계층에서 높은 난류에너지 생성

을 나타낸다.

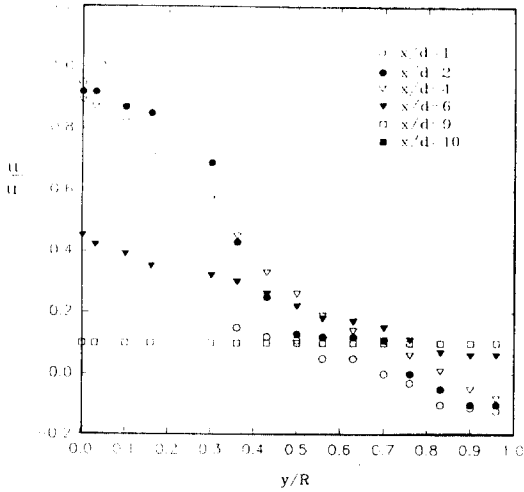


Fig. 8 Axial velocity profiles in an abrupt expansion pipe using pitot tube no swirl for  $Re=80000$

Fig. 9와 Fig. 10은 선회유동일 때,  $Re=60000$ 일 때 각각  $L/d=0(s=0.70)$ 과  $L/d=8(s=0.65)$ 에서의 공기유동을 시험관의 중앙으로 유입 팽창시킨 상태 하에서의 축방향 속도를 나타낸 그림이다. 모든 그래프에서 횡좌표 축은 반경방향 거리를 나타낸 것이며 종좌표 축은 축방향속도를 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 축방향 거리에 따른 속도 분포는 비선회유동의 경우보다 전반적으로 그 값이 훨씬 작은 값들로 나타났으며, 최대속도는 축방향거리가 증가되었을 때 점진적으로 시험관의 관벽쪽으로 이동하는 경향을 보였다. 또한 관의 중심부근에선 부(-)의 속도, 즉 역방향 속도가 나타났다. 이러한 결과는 Dellenback<sup>(10)</sup>과 Habib와 McEligot<sup>(11)</sup>의 실험결과와도 일치함을 보여 주고 있다. 역시 선회강도가 증가했을 경우 ( $L/d=0$ )에는 축방향속도분포는 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 최대속도는  $x/d=1$ 의 위치를 제외하고는, 모두 관벽쪽으로 이동하는 현상을 보이면서 관 중심에서는 중앙 재순환 (Central Recirculation Zone)영역이 존재함을 보여 주고 있다. 두개의 그래프를 비교해 볼 때, 선회강

도가 강해지면 최고 값의 위치는 벽쪽으로 이동하고 역방향속도는 증가하며, 반면 선회강도가 약해지면 최고 값의 위치는 중심으로 이동하면서 역방향속도는 감소하고 있다.

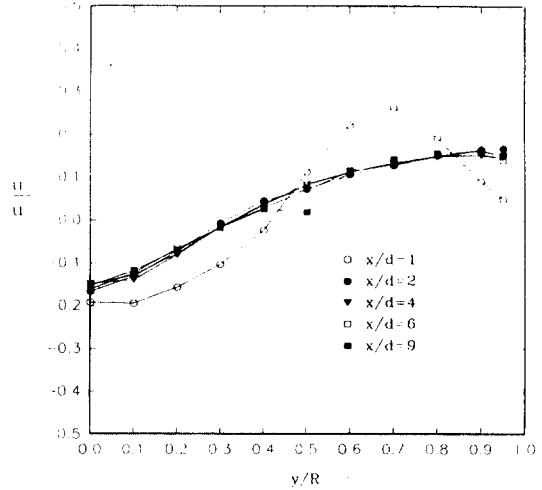


Fig. 9 Axial velocity profiles for  $Re=60000$  with swirling flow at  $L/d=0$

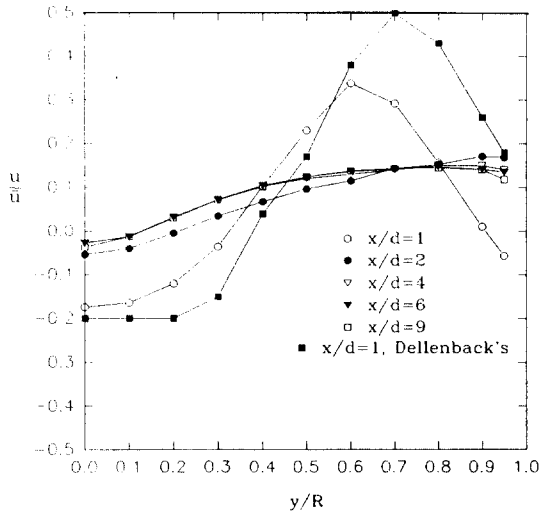


Fig. 10 Axial velocity profiles for  $Re=60000$  with swirling flow at  $L/d=8$

Fig. 11은  $Re=80000$ ,  $L/d=0(s=0.93)$ 일 때의 속



도분포로써, 선회강도가 동일하면  $Re=60,000$ 일 경우보다 속도변화가 훨씬 큰 변화를 보여 주고 있다. 또한 관 중심에서의 재 순환현상도 심화되고 있음을 나타내면서 관벽에서의 속도 값도 증가하고 있다.

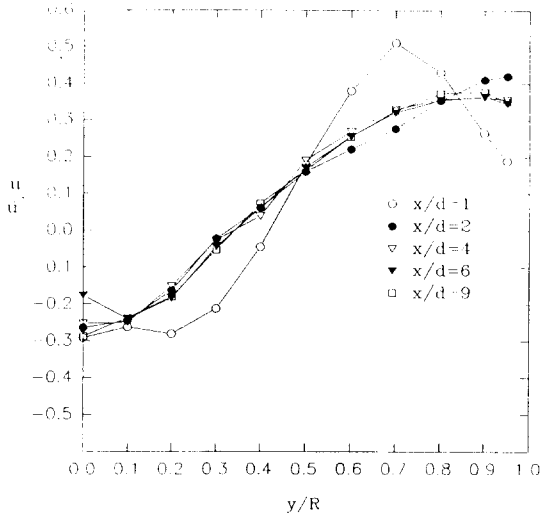


Fig. 11 Axial velocity profiles for  $Re=80000$  with swirling flow at  $L/d=0$

### 3.1.2 재부착 길이

최대 열전달계수는 재부착점 또는 그 부근에서 일어난다고 확인(Ede 등<sup>2)</sup>, Krall과 Sparrow<sup>3)</sup>, Zemmanick과 Dougall<sup>1)</sup>) 되고 있으므로, 재부착 길이를 파악하는 것은 대단히 중요한 점이다. 본 실험에서는 선회발생기로 접선방향 입구조건으로 하고 오일에 카본 가루를 섞어서 시험관의 측정공에 주입하여 선회유동현상을 가시화실험을 통해 관찰하였다. 따라서 본 실험에서는 재부착 길이의 자료를 얻기 위하여, 유체실험장치에서 시험관을 분리하여 접착 종이를 부착시켰다.  $Re$ 수를 80000으로 하고서, 비선회의 경우와 선회강도  $L/d=0$ 으로, 사전에 두 가지로 선택하여 공기를 정상흐름으로 하고서, 각각 추적유체를 측정공속으로 주입시켰다. 송풍기의 작동을 멈춘 후, 시험관을 분리시켜 접착 종이를 시험관으로부터 떼어 내서 축방향으로 관계된 유적 길이를 측정하였다. 그 결과 비선회유동의 경우에는 재부착길

이는 4~5 스텝 높이어었고, 선회유동이었을 경우에는 1~1.4 스텝 높이가 되었다. Fig. 12는 선회유동의 경우이고, Fig. 13은 비선회유동의 경우이다.

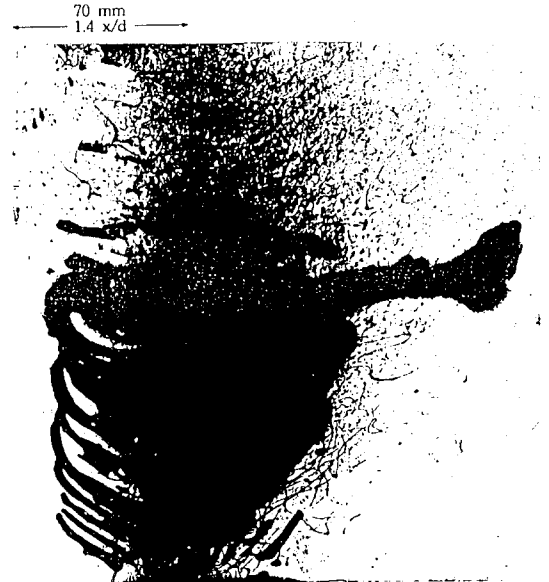


Fig. 12 Flow visualization results,  $Re=80000$ ,  $L/d=0$  and  $x/d=1$

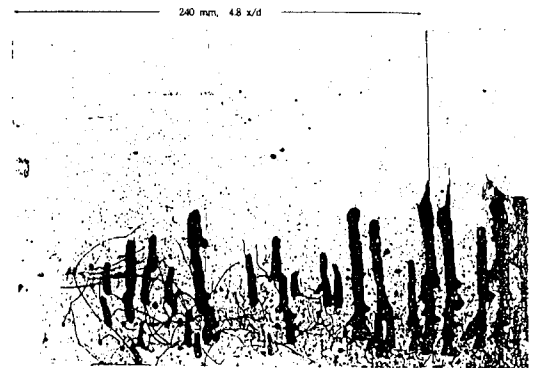


Fig. 13 Flow visualization results,  $Re=80000$ , no swirl

### 3.1.3 정압분포

Fig. 14는 비선회유동일경우, 각 측정위치에서 정압  $x=0$ 에서 중심선 속도의 동압으로

무차원화하여 나타낸것이다. 반경방향의 압력 기울기는 길이 방향에 비하면 매우 적은 값이다.

Fig. 14에서 벽면압력계수  $C_p$  는  $x/d$ 가 4일때까지는 영을 유지한다. 이것은 Chaturvede<sup>13)</sup>실험에서 음의 압력 기울기가 나타나는 것과 차이가 있는데 여기서는 확대비가 더 크므로 흐름이 벽면의 영향을 덜 받는다.

정압 분포에서  $x=4d$ 까지는 재순환 영역(Recirculating Zone),  $x=4d$ 에서  $x=11d$ 까지는 재부착 영역(Reattachment Zone)이고,  $x=11d$ 이후는 발달영역(Development Zone)임을 나타낸다. 레이놀드수가 증가할수록 벽면 압력계수의 크기는 감소하고 있다.

재부착영역인  $4d$ 에서  $11d$ 영역사이에서는 운동에너지가 압력에너지로 바뀌면서 유속은 단조적으로 감소되는 반면에 압력은 단조적으로 증가되어 압력 기울기는 역구배가 된다.

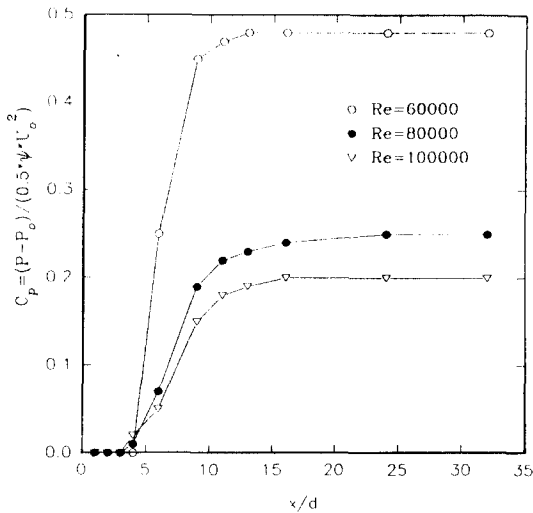


Fig. 14 Distribution of the wall pressure coefficient along the test tube

### 3.2 열전달 실험결과 고찰

#### 3.2.1 관벽온도와 체적온도

Fig. 15과 Fig. 16은 시험관에서 벽면온도( $T_w$ )를

나타내고 있는데, 비선회일 때 관벽온도는 Re수가 작을수록 크게 높아졌고,  $x/d=10$ 으로부터  $x/d=40$ 까지 온도상승율이 급격하게 증가하였으나 그 이후부터는 완만히 증가하다가 감소하였다. 또한 급확대일 때 벽면온도는  $x/d=6$  부근에서 최소치가,  $x/d=48$ 에서 최대치를 보여 주고 있다. 아울러 시험관 입구에서는 온도가 낮게 나타났을 뿐만 아니라 불안정함을 보였는데, 이는 단면변화의 영향과 유동이 충분히 발달하지 못한 결과로 Ede 등<sup>(2)</sup>은 보고하고 있다.

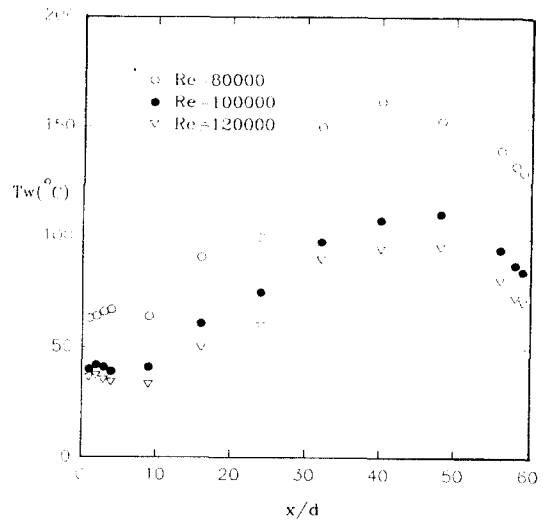


Fig. 15 Distribution of wall temperature profiles along the test tube

Fig. 16에는 선회강도가 파라미터로 되어 있는데, 이는  $L/d$ 의 영향을 강조하는데 있다. 선회유동이 있을 때는 선회강도가 약해지면, 관벽온도의 온도상승율은 더 높게 나타났다.

Fig. 17와 Fig. 18은 역시 시험관을 따른 체적온도( $T_b$ ) 분포를 보여 주고 있는 그래프인데, 체적온도는 동일 위치에서 비선회유동의 경우 Re수가 작을수록 전반적으로 높게 나타났다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 특히 체적온도는 관 입구영역에서 서서히 감소하여  $x/d=6\sim 9$  부근에서 최소치를 보이다가, 다시 시험관을 따라 거의 점진적으로 증가함을 나타내어 주고

있다. 선회유동의 경우에는 선회강도가 강하였을 때 온도상승율은 큰 변화를 보였으나, Re수에는 이에 비해 그다지 큰 변화를 보이지 않았다.

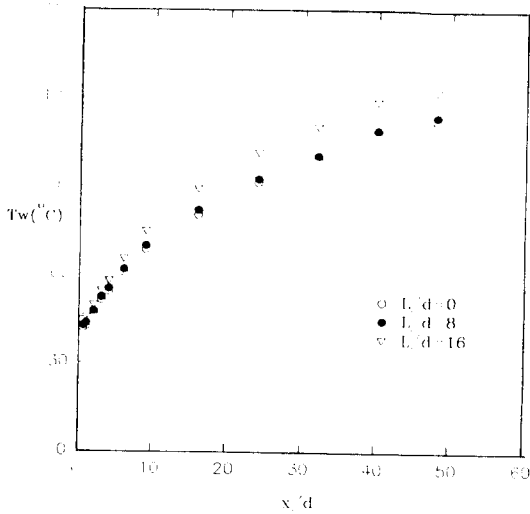


Fig. 16 Distribution of wall temperature profiles with swirl along the test tube Re=60000

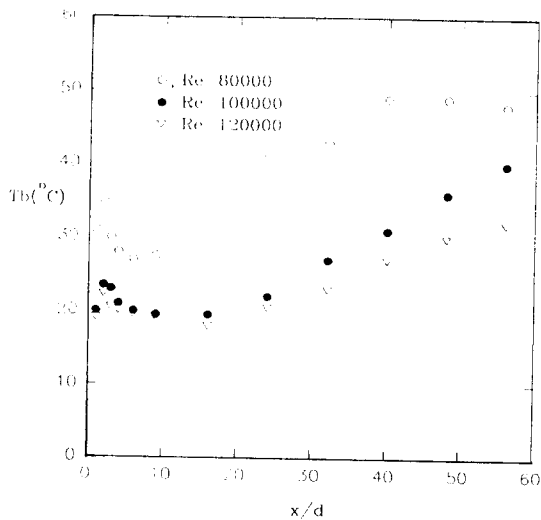


Fig. 17 Distribution of bulk temperature profiles along the test tube

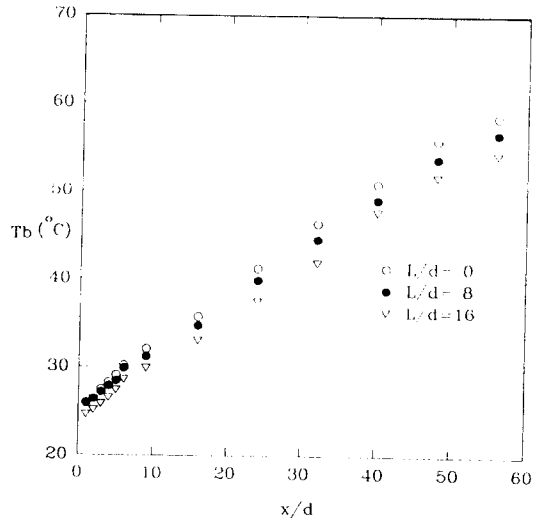


Fig. 18 Distribution of bulk temperature profiles with swirl along the test tube for Re=80000

### 3.2.2 열전달

Fig. 19는 비선회 유동시의 Re수의 변화에 따른  $Nu/Nu_{db}$ 의 분포를 나타낸 것이다. 그래프에서 축 방향거리는 하류부의 스텝 높이로써 무차원화 되어 있는데, 왜냐하면 재부착길이는 이 길이 스케일과 더불어 잘 연관되어 있는 것으로 나타내 왔기 때문이다.

또한 그래프에서  $Nu_{db}$ 는 완전 발달된 원관내의 유동에서의 Nusselt수를 Dittus-Boelter식( $Nu_{db}=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ )으로부터 계산한 값을 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 전반적으로 Nu수는 관 입구에서부터 시험관을 따라 급격히 증가하다가  $x/d=24$  이후부터는 거의 그 값이 일정하였다. 최대  $Nu/Nu_{db}$ 수의 위치는 Re=60000, 80000일 때  $x/d=4$ 에서 나타났다. 이러한 현상은 급확대되는 원관내 유동에서는 박리로 인한 난류운동에너지의 증가로 관내 입구영역에서 최고 열전달계수가 아주 큰 비율로 증가된다는 사실과 아주 잘 부합되고 있다.

그리고 이를 Baughn<sup>3)</sup> 등의 실험치(Re=76000)일 때 6 step heights와 비교하면 다소 차이를 보이고 있는데 이러한 결과는 확대비의 차이에서 영

향을 받은 것으로 여겨진다. 반면  $Re=100000$ 일 때 그 위치는  $x/d=6$ 에서 나타났으며, 결과적으로  $Re$ 수가 작을수록  $Nu/Nu_{db}$  값은 커지고,  $Re$ 수가 클수록 그 값은 작게 나타났다. 이와 같은 결과들도 Dellenback<sup>15)</sup>의 실험결과와 비교해 보면 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 선회각이 없는 경우, 완전히 발달된 유동에 대한 Nusselt수의 접근은  $Re$ 수의 증가와 더불어 보다 빨리 일어났다.

특히, Boelter 등<sup>1)</sup>, Habib와 McEligot<sup>11)</sup>, Ede<sup>12)</sup>, Krall 과 Sparrow<sup>3)</sup> 등과 같은 많은 연구자들에 의한 급확대관에 대한 열전달 조사 연구결과에 따르면, 최대 열전달계수는 재부착점 또는 그의 근처에서 발생된다고 구명하였다. 그리고 본 연구의 가시화 실험에서도 재부착길이가 비선회유동일때 4~5 스텝 높이로 나타난 점과 관련지어 고려해 보면, 최대 열전달이 역시 이 위치에서 일어났음은 이 분야 많은 연구자료에서 지적한 결과와 동일한 결과로써 일치하였음을 잘 알 수 있다.

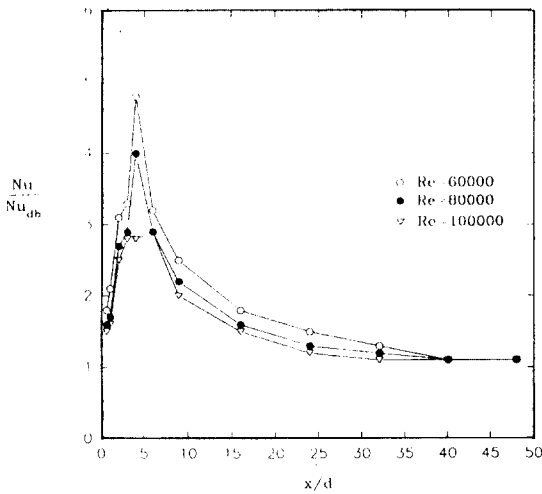


Fig. 19 Distribution of  $Nu/Nu_{db}$  along the test tube no swirl

Fig. 20와 Fig. 21은  $Re=60000$ 과  $Re=80000$ 일 때 선회각도의 함수로서  $Nu$ 수를 시험관의 축방향 거리에 따라 측정된 것을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이  $Nu/Nu_{db}$ 는 각각

관입구에서부터 시험관을 따라 급격히 증가하다가  $x/d=1$ 에서 최고치를 나타낸 후,  $x/d=3$  이후부터 급격히 감소하여 다시  $x/d=16$  이후부터는 거의 완만하게 그 값이 변화하였다. 즉, 최고 Nusselt수의 위치는  $Re=60000$ 과  $80000$  일 때 모두  $L/d=0$ ,  $L/d=8$ 의 경우  $x/d=1$ 에서 나타났다. 또한  $L/d=16$ 의 경우에는  $x/d=2$ 에서 나타났는데, 이들을 모두 비선회유동일 때와 비교해보면,  $Nu_{max}$  위치는 상류부쪽으로 이동하였음과 더불어 그 값에 있어서도 현격한 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 선회로 인한 전단율의 증가 및 난류운동에너지의 증가로 인한 현저한 차이에서 영향을 받아 기인된 결과라고 사료된다.

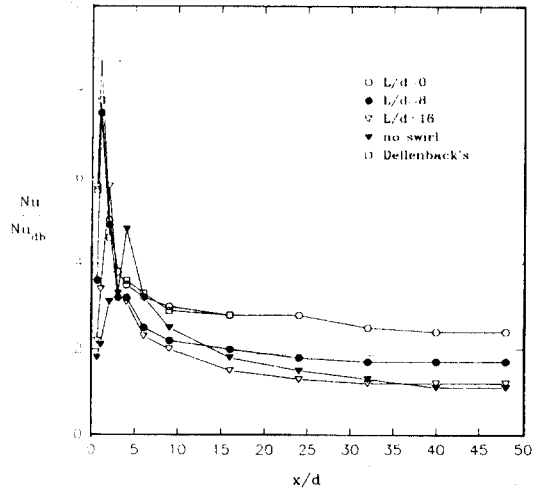


Fig. 20 Distribution of  $Nu/Nu_{db}$  along the test tube abrupt expansion for  $Re=60000$  with swirl

이러한 최고 Nusselt수의 상류부로의 이동은 재부착 길이의 단축의 직접적 결과로 생각된다. 재순환 영역의 단축은 전단율을 야기시키고, 결과적으로 보다 큰 열전달율을 증가시키기 위한 난류 운동에너지를 만들어 주기 때문이다. 이러한 증진은 평균 축방향 속도가 일정한 값에서, 접선방향 속도성분이 증가함에 따라, 보다 큰 국소 평균속도에 의해서 또한 촉진된다고 할 수 있다.

그리고 두개의 그래프에서  $Nu_{max}$ 의 위치는 선회강도의 강력한 함수로 존재하고 있음을 극명하게 나타내 주고 있다. 특히  $L/d$ 가 0 일 때 즉, 선회강도가 제일 증가하였을 때 전반적으로 관입구에서 제일 큰 값으로 나타난 것은, 점선방향의 큰 속도 구배와 높은 난류성분으로 인하여 시험관의 입구 영역에서 큰 혼합율과 열전달을 촉진시킨 것으로 여겨진다.

그리고 선회유동은 시험관 입구에서 결과적으로 열전달을 증대시키었고, 열적입구 영역에서 그 값은 비선회유동인 경우보다 더 오랫동안 지속되었다. 또한 Fig. 19와 비교하여 알 수 있는 바와 같이, 각각의  $Re$ 수에 따른  $Nu$ 수의 비선회 유동일 때 결과의 비교는 선회가 존재할 때 열전달율의 보다 큰 증가됨을 알 수 있다. 즉, 선회는 전단율을 증가시키고, 더 큰 난류를 만들며, 결과적으로 급확대의 효과와 마찬가지로 비선회난류 경우보다도 더욱 큰 열전달효과를 나타나게 한다<sup>7)</sup>는 종전의 연구결과에 합치된다.

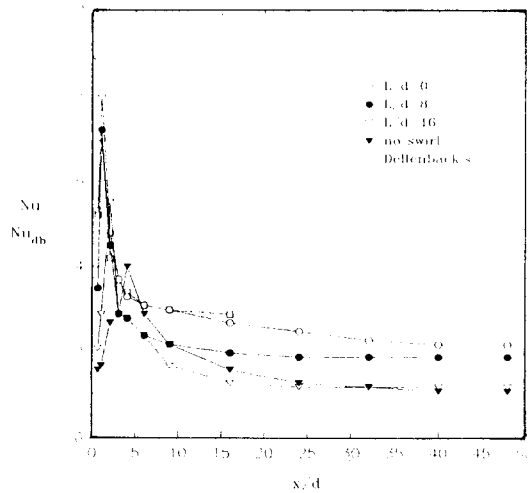


Fig. 21 Distribution of  $Nu/Nu_{ab}$  along the test tube abrupt expansion for  $Re=80000$  with swirl

따라서, Hay와 West<sup>7)</sup>, Sparrow와 Chaboki<sup>19)</sup> 등과 같은 많은 연구자들에 의해 선회유동에 대한 열전달 효과는 급확대의 효과와 마찬가지로

열전달율을 크게 증진시킴은 물론 최대 열전달이 나타나는 위치는 상류부측으로 이동된다는 일치된 연구결과들과 비교하여 본다면, 본 연구에서 급확대 선회유동에 대한 가시화 실험을 통한 재부착길이의 단축 결과(1~1.4 스텝 높이)는 종래의 연구결과들과 정성적으로 극히 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 또한 본 연구와 유사한 극히 제한된 수효의 연구결과이나, 1986년 Dellenback의  $Re=100000$ 일 때의 실험적 연구결과에 따르면, 그의 유동장 실험에서, 재부착길이는 1.8 스텝 높이에서 나타났으며, 열전달 조사에서 최대 열전달 계수는 1.4 스텝 높이에서 일어났음을 발표하였다.

본 연구결과들을 이와 견주어 고찰해 볼 때, 재부착 길이는 1~1.4 스텝 높이로 상류부로 이동함과 동시에 최대 열전달은 1 스텝 높이로 재부착길이 내에서 발생되었음을 함께 검토해 볼 때, 두 연구자의 실험결과는 아주 잘 일치함을 알 수 있었다.

또한 Fig. 22는 확대비가  $Nu/Nu_{ab}$  값에 미치는 영향을 파악하기 위하여  $Re=60000$ 일 때 선회강도를 파라미터로 하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있는 바와 같이, Fig. 20와 비교해 보면 전반적으로 그 값들이 감소하였음을 알 수 있다.

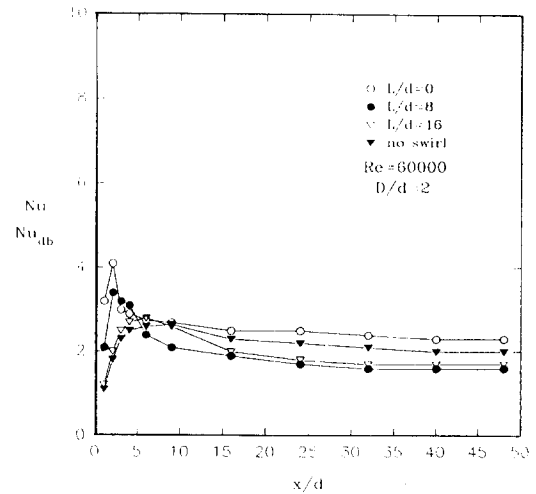


Fig. 22 Distribution of  $Nu/Nu_{ab}$  along the test tube for  $Re=6000$  with swirl,  $D/d=2$

#### 4. 결론

원관내에서 급확대관으로의 유입조건에 선회유동을 관련시켜 급확대하는 난류선회유동의 축방향 속도성분 유동을 고찰하고, 균일 열프럭스가 이 유동에 미치는 열전달 영향을 파악하기 위하여, 이에 대한 실험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 비선회유동일 때는 입구근처의 관벽부근에 재순환 영역이 존재하였으며, 반면 선회유동일 때는 중앙재순환영역이 존재하였음을 확인하였다.

2) 재부착길이는  $Re=80000$ 일 때 비선회유동일 때는 4~5 스텝 높이이었고, 선회유동일 때는 1~1.4 스텝 높이이었다.

3) 축방향 최대속도는 축방향거리가 증가함에 따라 점진적으로 시험관의 관벽쪽으로 이동하였다.

4) 정압 분포에서 확대비가 2와 3일경우, 비선회유동일때  $x=4d$ 까지는 재순환 영역(Recirculating Zone)으로,  $x=4d$ 에서  $x=11d$ 까지는 재부착영역(Reattachment Zone)으로 나타났다.

5) 관입구에서 벽면온도와 체적온도 모두 최소치를 나타내었고, 선회강도가 증가할 때 벽면온도는 낮게 나타난 반면, 체적온도는 높게 나타났다.

6) 선회유동일 때 최대  $Nu/Nu_{db}$ 의 위치는  $Re=60000$ 과  $80000$ 일 경우 모두 1 스텝 높이에서 나타난 반면, 비선회유동일 경우의 최대  $Nu/Nu_{db}$ 는 4 스텝 높이에서 나타났다.

7) 확대비가 2일경우, 관입구 영역에서의  $Nu/Nu_{db}$ 의 값은 확대비가 3일경우보다 크게 감소하였다.

— Nomenclature —

- d : upstream tube diameter
- D : inside diameter of test section tube
- H : step height
- k : thermal conductivity of air
- $\dot{m}$  : mass flow rate
- L : distance along the plenum chamber
- R : radius of a downstream tube
- r : radial position
- $T_b$  : bulk temperature

- $T_w$  : wall temperature
- u : local velocity
- $\bar{u}$  : mean axial velocity in upstream tube
- x : axial distance from expansion face
- y : distance from the wall
- Re : Reynolds number
- s : swirl number
- $(s = 1/R [ \int_0^R \bar{u} \bar{w} R^2 dR / \int_0^R \bar{u}^2 R dR ] )$
- Nu : Nusselt number
- $Nu_{db}$  : Nusselt number for Dittus-Boelter equation
- $\rho$  : density

#### 5. 참고문헌

- 1) Boelter, L.M.K., Young, G. and Iversen, H.W., "An Investigation of Aircraft Heaters XXVII - Distribution of Heat Transfer Rate in the Entrance Section of a Circular Tube", NACA-TN-1451, 1948
- 2) Ede, A.J., C.I. Hislop and R. Morris, "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, pp. 1113-1126, 1956
- 3) Krall, K.M., and Sparrow, E.M., ASME Trans., "Turbulent Heat Transfer in the Separated, Reattached, and Redevelopment Regions of a Circular Tube," *J. of Heat Transfer*, Vol.88, No.1, Series C, Feb. 149pp. 131-136, 1966
- 4) Zemanick, P.P. and R.S. Dougall, ASME Trans., "Local heat transfer downstream of abrupt circular channel expansion", *J. of Heat Transfer*, Vol.92, pp. 53-60, 1970
- 5) Baughn, J.W., M.A. Hoffman, R.K. Takahashi and B.E. Launder, ASME Trans., "Local Heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Channel With Constant Wall Heat Flux", *J. of Heat Transfer* Vol.106, 789-796, 1984
- 6) Syred, N. and Beer, J.M., "Combustion in

- Swirling Flows: A Review", *Comb. Flame*, Vol.23, pp. 143-201, 1974
- 7) Hay N. and West P.D., "Heat Transfer in Free Swirling Flow in a Pipe", *ASME Trans., J. of Heat Transfer*, Vol.97, pp. 411-416, 1975
  - 8) Zaherzadeh, N.H. and Jagadish, B.S., "Heat transfer in decaying swirl flows", *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 18, pp. 941, 1975
  - 9) Sparrow, E.M. and Chaboki, A., "Swirl-Affected Turbulent fluid flow and Heat Transfer in a A Circular Tube", *ASME Trans., J. of Heat Transfer*, Vol.106, pp. 766-773, 1984
  - 10) Dellenback, P.A., D.E. Metzger and G.P. Neitzel, "Heat Transfer to Turbulent Swirling Flow through a Sudden Axisymmetric Expansion", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.109, pp. 613-620, 1987
  - 11) Habib, M.A., and D.M. McEligot, "Turbulent Heat Transfer in a Swirl Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion", *Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Washington, D.C, pp. 159-165, 1982
  - 12) Sultanian, B.K., "Numerical Modeling of Turbulent Swirling Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion", Ph.D. Dissertantion, Arizona State University, 1984
  - 13) Chaturvedi, M.C., "Flow characteristics of axisymmetric expansions", *ASCE, J. Hydraulics Kev.* Vol. 89, pp. 61-92, 1963
  - 14) Ede, A.J., "The heat-transfer coefficient for flow in a pipe", *Internat. J. Heat and Mass Transj.*, 4, pp. 105-110, 1961
  - 15) Dellenback, P.A., "Heat transfer and velocity measurements in swirling flows through an abrupt axisymmetric expansion", Ph.D. Thesis, Arizona State University, Tempe. 1986