

# 수평 원통관내에서 Swirling Flow의 유동에 관한 연구(I)

## A Study of Swirling Flow in a Cylindrical Tube Part 1, Velocity Profiles

J. O. Medwell\*, 장 태 현\*\*, 권 순 석\*\*\*  
T. H. Chang, S. S. Kwon

### ABSTRACT

An experimental study of decaying swirl air flow has been obtained by tangential inlet in a straight tube with Reynolds number range 20,000~40,000.

The friction factor, swirl angle, velocity profiles and turbulent intensity are measured by using micro-manometer and hot-wire anemometer. It is found that the swirl flow behaviors depend on the swirl intensity along the test tube.

Key Words ; Tangential inlet(접선방향 입구)	f	Friction factor for fully-developed flow
Swirl angle(스윙각), Vortex core (소용돌이 핵)		
Swirl generator(스윙 발생기)	$f_s$	Friction factor for swirl flow
Axial momentum(축방향 모멘텀)	H	Yaw factor
Angular momentum(각방향 모멘텀)	K	Pitch factor or constant for multi-pitot Tube
Swirl chamber(와류실)	L	Axial distance between the exit of swirl chamber and the inlet of test section tube
Fluctuating velocity(과동속)		
Curved stream line(굽은 유선)		
<b>Nomenclature</b>		
A, B Constants	n	The exponent of each probe
D The test tube diameter	NUM	Numerical
E Instantaneous Voltage	R	The Test Tube Radius
Exp. Experimental	r	Radial component of cylindrical co-ordinate

\* University College of Swansea(U. K.)

\*\* 경남대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 동아대학교 공과대학 기계공학과

U, V, W	Velocity components
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$	Average velocity components
$U_b$	Velocity component perpendicular to the prongs-sensor plan
$U_n$	Velocity component perpendicular to hot-wire along the probe axis
$U_p$	Velocity component parallel to the sensor
S	The slop of each probe or swirl number (Eq.3)
u, v, w	Fluctuating components
X	The axial distance from swirl generator

### GREEK SYMBOL

$\alpha$	The yaw angle or Sensor angle
$\beta$	Angle of rotation
$\theta$	Swirl angle

### SUBSCRIPTS

eff	effective
b	binal
n	normal
p	parallel
s	swirl

## 1. 서 론

에너지의 고갈이 심화되면서부터 에너지의 효율적 이용에 대한 강조가 날로 높아져 가고 있다.

많은 열교환기의 설계에서 인공조도를 활용하고, 열전달면에 나선형 표면, 너클 면, 기계적 거칠기, 와이어 코일을 만들거나 핀을 이용하여 열전달면을 증가시킴으로써 대류 열전달계수를 증가시킬 수 있었다.

이와 같은 방법 외에 굽은 유선(Curved Stream line) 혹은 스월 유동장을 활용함으로써 가열된 벽면으로부터 유체입자에 에너지를 더 많이 이동시킬 수 있었다.

스월 유동에 대한 초기 연구로서는 1954년 TALBOT<sup>1)</sup>는 층류 스월유동에서 스월 방

정식을 유도하고, 염색액과 오일을 이용하여 스월 유동의 소멸 현상을 연구하였다.

BINNE<sup>2)</sup>와 ROBERT<sup>3)</sup>는 공기와 물에 색소를 주입함으로써 시험관 중심에서 축 방향 속도(Axial velocity)가 역류되는 현상을 관찰하였고, CHIGIER<sup>4)</sup> 등은 Five holes pitot tube를 사용하여  $Re = 60,000 \sim 70,000$ 에서 공기의 축 방향속도와 관벽에서의 압력을 측정하였다.

1960년대 이후부터 열선 풍속계를 스월 유동의 측정에 사용하기 시작하였다. ROSE(1962), ROBERT(1965), WOLF(1969) 그리고 WESKE(1974) 등은 열선풍속계를 사용하여 공기나 물에서 축방향, 반경방향속도와 레이놀즈 응력(Reynold stress)를 측정하였다. 근래에 와서 HABIB(1980), SISLIAN(1986) 그리고 KOMORI(1985) 등은 Lazer Doppler Annemometry를 사용하여 속도성분과 난류강도 등을 측정하였다. Table 1에서 수평원통관내에서의 스월유동에 관한 연구사항을 연대별로 요약하였다.

이와같이 다수의 연구자가 피토우 튜브, 열선풍속계, LDA 등으로 스월유동을 연구하였지만 실제로 접선방향 입구조건으로 압력손실부터 속도성분과 난류강도, 운동에너지(Kinetic energy)를 연구한 사람은 드물다.

본 연구에서는 수평 원통관에서 접선방향 입구조건으로 스월유동을 만들고 관 마찰계수, 속도성분, 스월 각(Swirl angle), 난류강도, 레이놀즈 응력 및 운동에너지를 실험 및 수치해석 방법으로 연구하였으며, 제 1 보에서는 관 마찰계수, 속도성분 그리고 스월 각(Swirl angle) 등의 실험결과만을 발표하고자 한다.

## 2. 실험장치

스월유동(Swirling flow)의 연구 초기에는 비틀림테입을 주로 사용하였으나 본 연구에서는 접선방향 입구조건으로 스월유동을 만들었다.

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 설계도를 나타내고 있다. Fig. 2에서 스월 발생기의 횡단면도를 나타내고, 스월발생기의 외부표면에서

22.75° 간격으로  $\phi 3.47$ 의 구멍을 접선방향으로 뚫어서 제작하였다.

와류실 (Swirl chamber)은 스윙강도를 조절하기 위하여 스윙발생기 (Swirl generator)를 이동시킬 수 있도록 설계하였고, 와류실 사이에는 공기의 누입을 방지하기 위하여 지름 3 mm의 O-링을 사용하였다.

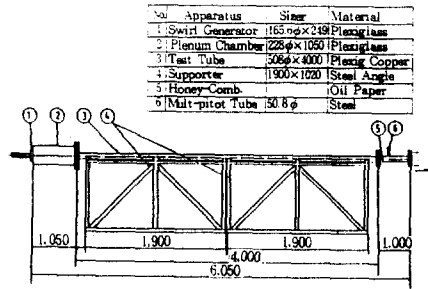


Fig.1 The Assembly of Experimental Apparatus

Table 1 Summary of Previous Experimental Studies of Swirl Flow

No.	Author Year	Type of Flow	Working Fluid	Pipe Size	Range of Re.	Measured Parameters	Experimental Apparatus
1	Nuttall 1953	swirl guide vanes	water	pipe 27" x 8	$10^4 \sim 3 \times 10^4$	U	Kangue-Hilsch vortex tube
2	Talbot 1954	swirl rotation section	water	pipe 1.25" x 1.750 <sup>L</sup>	$2.7 \times 10^3$	U	motion picture dye filament
3	Binne, Teare, 1955	swirl conical nozzle	water	pipe 12.0 inch	$Re 2 \times 10^4$	U, V P	pressure probes
4	Binnie 1957	swirl rotating section	water	pipe 50" x 1.676 <sup>L</sup>	60-260	flow visual-iazation	by dye injection
5	Rose, 1962	swirl rotating pipe	air	pipe 13.5" x 1.350 <sup>L</sup>	$1.5 \times 10^4$	U	hot wire anemometer
6	Kreith, Sohsu, 1965	swirl twisted tape	water	pipe 25.4"	$10^4 \sim 10^5$	U	swirl vortex-meter
7	Robert, Chanaud, 1965	swirl tangential	air water	pipe 25.4"	$2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3$	U	hot wire anemometer
8	Chigier, 1967	swirl tangential slot	air	pipe 600mm" x 25.4 <sup>L</sup>	60,000~ 75,000	U, P	5 hole hemispherical impact tube
9	Wolf, Lavan, 1969	swirl vane	air	pipe 76.2" x 5.486 <sup>L</sup>	$0.8 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$	U, W P, T	pressure probes
10	Yesutoshi Tetusou, 1972	swirl circular cascade		pipe 150mm" x 9,000 <sup>L</sup>	$1.5 \times 10^5 \sim 1.95 \times 10^5$	P,	pressure probes
11	Yajnik, Subbaian 1973	swirl entry vanes	air	pipe 120.5" x 6,000 <sup>L</sup>	$0.6 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^5$	friction factor	pressure probes
12	Weske, Sturov 1974	swirl rotating pipe	air	pipe 100" x 450 <sup>L</sup>	$3 \times 10^4$	U, V, W, eddy stress	hot-wire anemometer
13	Murakami et al., 1976	swirl impeller	water	pipe 102.2" x 5,400 <sup>L</sup>	$1.0 \times 10^5$	U, V, W,	pitot tube
14	Agrawal Varma, 1982	swirl twisted tape	R-12	pipe 10" x 2,100 <sup>L</sup>	$0.7 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$	P	pressure transducer
15	Sparrow, Chaboki, 1984	swirl tangential inlet	air	pipe 23.62" x 1,797. <sup>L</sup>	9,000~ 43,500	swirl angle Nusselt no. friction factor	pressure probes Thermo-couples
16	Present 1989	swirl tangential inlet	air	pipe 50.8" x 4,000 <sup>L</sup>	$10^4 \sim 6 \times 10^4$	U, V, W, P, T friction factor	hot-wire pressure probes Thermo-couples

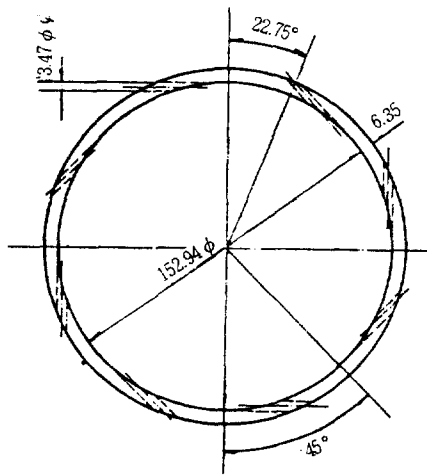


Fig. 2 A cross section of the Swirl Generator

시험관은 직경 2" (50.8mm), 길이 4,000mm의 투명관을 이용하여 관 벽의 압력과 유속을 측정할 수 있도록 측면과 윗면에 구멍을 뚫어  $\phi 7\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 동관을 설치하였다.

시험관의 끝에는 다시 평균유속을 측정하기 위하여 멀티피토투튜브(Multi-pitot tube, TORBAR 301)을 설치하여 미압계(Micro-Manometer)에 연결함으로써 레이놀즈 수를 결정할 수 있었다. 또한 스월유동에서 축방향 속도성분의 역류에 의한 평균속도 측정의 오차를 막기 위하여 Multi-pitot tube 앞에 벌집(Honey-comb)을 설치함으로써 쉽게 평균속도를 얻을 수 있었다.

다시 실험장치를 대형 송풍기에 연결하여 실내공기를 흡입시킴으로써 스월 발생기에서 공기가 접선방향으로 유입되므로써 스월유동을 만들 수 있었다.

### 3. 실험방법

#### 1) 멀티피토투튜브(Multi-tube, TORBAR 301)의 검증

TORBAR 301은 영국의 Taurus Controls LTD의 제품으로 사용하기 전 제작회사에서 추천한 유량계산식을 검증하여 상수  $k$  값을 스월유동과 비스월유동(Non-swirl flow)에 대

하여 결정하여 Fig. 3은 그 검증결과를 나타내고 있다.

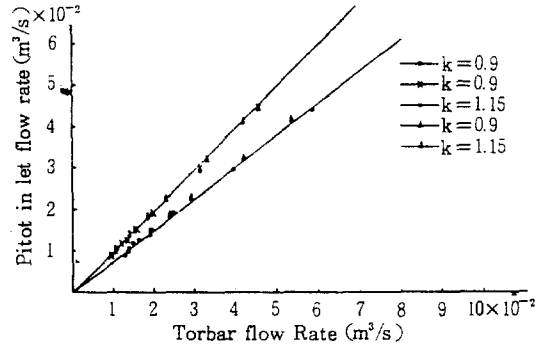


Fig. 3 Calibration of Torbar with Swirl Flow

#### 2) 열선풍속계의 검증

본 연구에서는 평균유속 및 파동속도(fluctuating velocity) 측정용으로 덴마크제 DISA 회사의 열선풍속계 3세트를 사용하였다.

측정을 시작하기 전 대형 풍동에서, 사용할 열선의 특성값을 구하고 피토투튜브의 결과와 비교하였다.

본 실험에서는 경사진 와이어(slanted wire)를 사용하였고, 이 와이어에 대한 속도성분은 ACRIVLELLIS<sup>11)</sup>와 CHANG<sup>12)</sup>에 의하여 다음 식(1)로 주어지고, 열선과 프롭 프롱(probe prong)의 평면을 실험관에 대해 직각으로 놓고 평면의 각을 비뚤음으로서 다음식으로부터 세 속도성분 및 파동속도(Fluctuating velocity)를 계산할 수 있었다.

$$E^2(\beta, \alpha)/S^2 = [(V+v) \cos \alpha + \{(U+u) \cos \beta - (W+w) \sin \beta\} \sin \alpha]^2 + H^2 \{[(U+u) \cos \beta - (W+w) \sin \beta] \cos \alpha - (V+v) \sin \alpha\}^2 + K^2 [(U+u) \sin \beta + (W+w) \cos \beta]^2 \dots (1)$$

이 식(1)은 다시 비스월유동(Non-swirl flow) 및 스월유동에서 다른 열선(Hot-wire)의 결과와 비교하여 Fig. 4에서와 같이 축방향속도의 만족한 결과를 얻었다.

실내공기를 송풍기에 의해서 스월발생기, 시험관 그리고 멀티피토투튜브를 통하여 흡입

사기므로서 스윙유동을 만들 수 있었다.

미압계를 시험관 끝에 있는 멀티피토우튜브에 연결하여 공기의 평균속도를 구하고 레이놀즈수를 결정하였다.

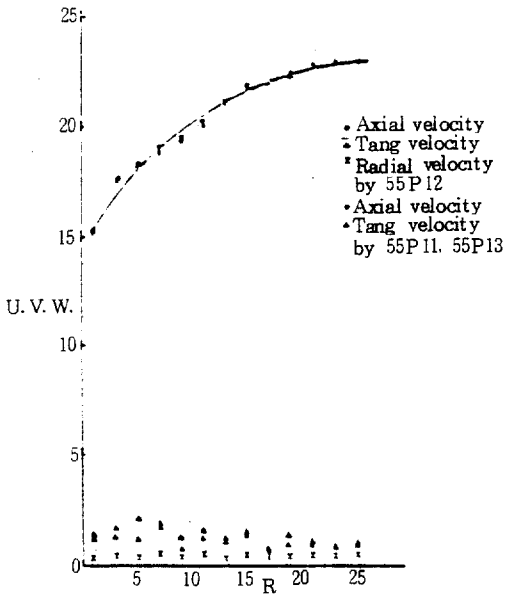


Fig. 4 Comparison of velocity by using 55P12 and 55P11, 55P13 for  $Re = 60,000$  at  $X/D = 59$  with no swirl

각 레이놀즈수에 따라 시험관의 각 위치( $X/D = 2, 10, 20, 41, 59, 76$ )에서 멀티마노메타를 이용하여 압력손실을 구하여 관마찰손실을 계산하고, 다시 시험관의 각위치에서 열선풍속계로부터 전기적신호를 측정하여 personal computer에서 식(1)과 (2) 그리고 (3)으로부터 속도성분과 스윙각, 스윙강도를 계산하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 1) 관마찰계수(Friction factor)

유체의 입자가 유동관을 따라 흐를 때 관벽에서의 마찰에 의해 압력의 손실을 일으키고, 이것은 유체수송 동력을 증가시키는 원인이 되기도 하므로, 유체역학에서 중요한 문제중의 하나이기도 하다. 특히 스윙유동에서

는 관 벽근처에서 접선방향 속도(Tangential velocity)가 축방향 속도(Axial velocity)에 비하여 그 비가 비스윙유동(Non-swirl flow)에 비해 아주 크므로 연구의 관심이 되어왔다.

본 연구에서는  $Re = 20,000 \sim 40,000$ 에서 스윙발생기의 위치( $L/D = 0, 8, 16$ )를 변경시키면서 관마찰 손실계수의 변화를 비스윙유동의 것과 Fig. 5에서 비교하였고,  $Re = 40,000$ 에

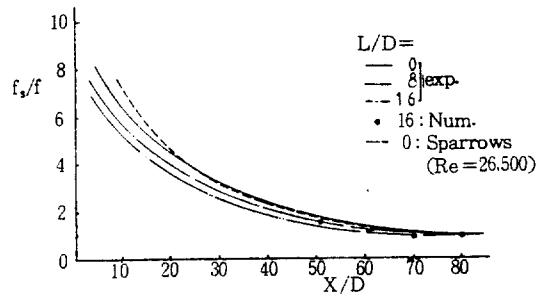


Fig. 5-1 Distributions of  $f_s/f$  for  $Re = 20,000$  with Swirl

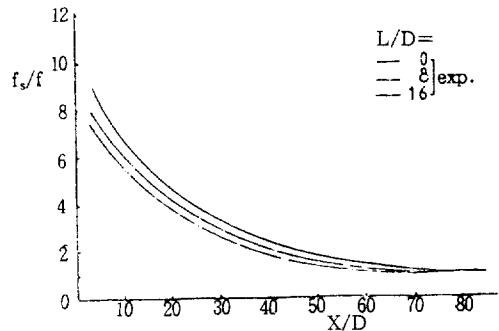


Fig. 5-2 Distributions of  $f_s/f$  for  $Re = 30,000$  with Swirl

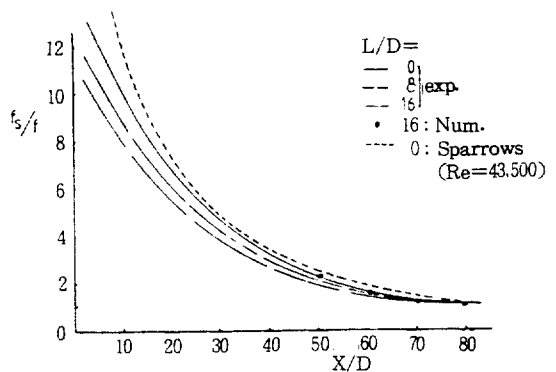


Fig. 5-3 Distributions of  $f_s/f$  for  $Re = 40,000$  with Swirl

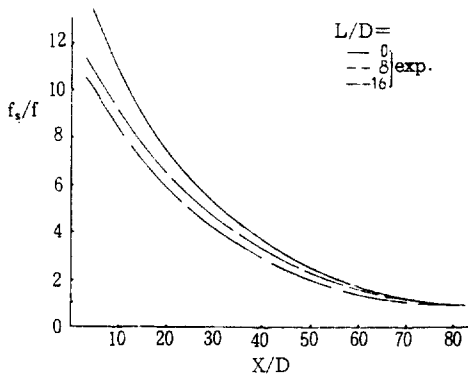


Fig. 5-4 Distributions of  $f_s/f$  for  $Re = 50,000$  with Swirl

서 그 결과를 SPARROW<sup>13)</sup>의 결과와도 비교한 결과 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

또한 관마찰손실계수 비  $f_s/f$ 는 관입구에서는 1000%~1300%까지 증가하나 스월유동이 소멸됨에 따라 감소하여 시험관 끝에서는 비스월유동의 값과 같아지는 특징을 나타내었다.

이와같이 마찰계수는 스월유동의 각도와 시험관의 입구로부터의 거리( $X/D$ )에 따라서 변하여 관 끝에 가서는  $f_s/f$ 가 1이 됨을 알 수 있다.

2) 축방향 속도(Axial velocity)

스월유동연구의 초기단계에서는 축방향속도를 피토우튜브에 의해 측정하였고, 스월유동의 강도가 0.6 이상에서 발생하는 소용돌이 핵내의 축 방향속도가 역류(Reversal flow)하는 현상을 ROBERT<sup>3)</sup> 등에 의한 실험에서는

시험관의 중심에 염색액을 주입함으로써 그 현상을 관찰할 수 있었다.

본 실험에서도 열선풍속계를 사용하기 전 TORBOR 301의 질량유량을 측정하기 위하여  $Re = 40,000$ 에서 축 방향속도를 피토우튜브로 측정하였고 그 결과를 Fig. 6에서 나타내고 있다.

이 그림에서 보는바와 같이 시험관입구에서는 Two shell을 나타낸다. 시험관에 따라서 Two shell은 One shell로 소멸되어 감을 볼 수 있고, 관 끝에서 비스월유동의 축 방향속도 분포와 같아짐을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서는 축 방향속도를  $X/D = 41, 59, 71$ 에서 측정한 값을  $Re = 20,000$ 과  $40,000$ 에서 보여주고 있다.

이들 결과에서 축 방향속도는 시험관의 관벽근처에서 최고값을 나타내고 관중심근처에서는 역 방향속도(Reversal velocity)를 나타내었다.

또한 이 속도분포는 시험관을 따라감에 따라 소멸되어 음의 축방향속도 역시 비스월유동의 속도분포와 유사해짐을 볼 수 있다.

3) 반경 방향속도(Radial velocity)

1970년대 이전까지는 대부분의 연구자는 반경방향의 속도성분은 무시하고 축방향과 접선방향의 속도만을 구하였다. 1976년 MURAKAMI<sup>14)</sup> 등은 세 속도성분, 전단응력 및 스월강도를 5400mm의 수관내에서 실험적으로 구하고, 이 실험에서 그는 연속의 식으로부터 반경방향 속도를 계산하였다.

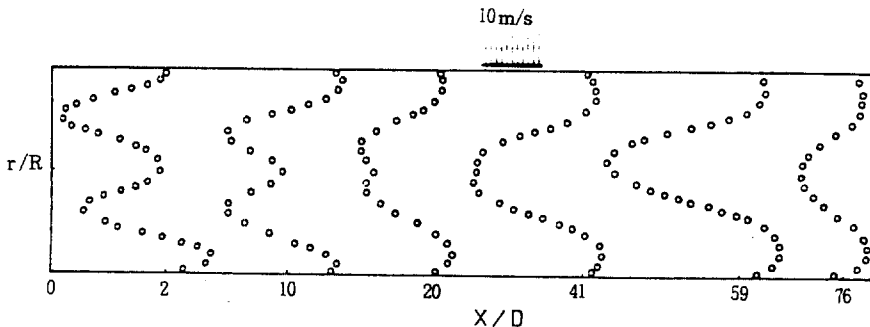


Fig. 6 Distributions of Swirl Axial Velocity Along the Test Tube for  $L/D = 8$  at  $Re = 40,000$  (Measured using Pitot Tube)

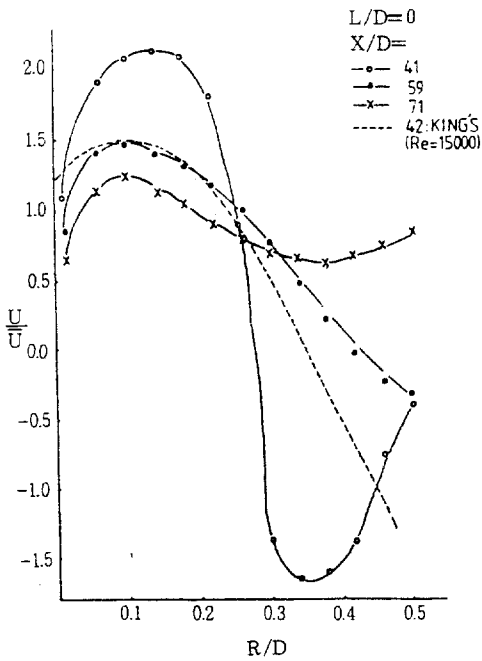


Fig.7 Experimental Axial Velocity Distributions Across the Test Tube with Swirl  $Re = 20,000$

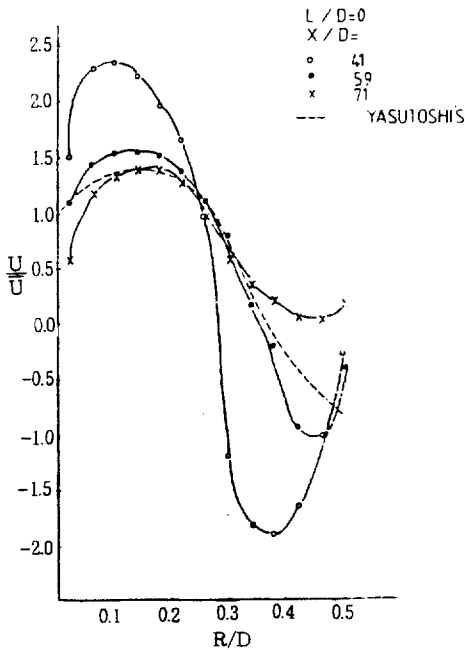


Fig. 8 Experimental Axial Velocity Distributions Across the Test Tube with Swirl for  $Re = 40,000$

본 연구에서는 열선풍속계로부터 얻은 전기적신호(D. C.)로부터 식(1)을 이용하여 반경방향속도를 계산하였다.

Fig. 9에서와 같이 이 속도성분은 시험관을 가로질러 아주 작은 값을 나타내고 있는것을 알 수 있다. 이 값들은 아주작은 성분으로 시험관을 따라서 비교하기가 어려웠다. 또한 관 중심근처에서는 부(-)의 속도를 나타내기도 한다. 이 결과는 MURAKAMI의 결과와도 일치함을 보여주었다.

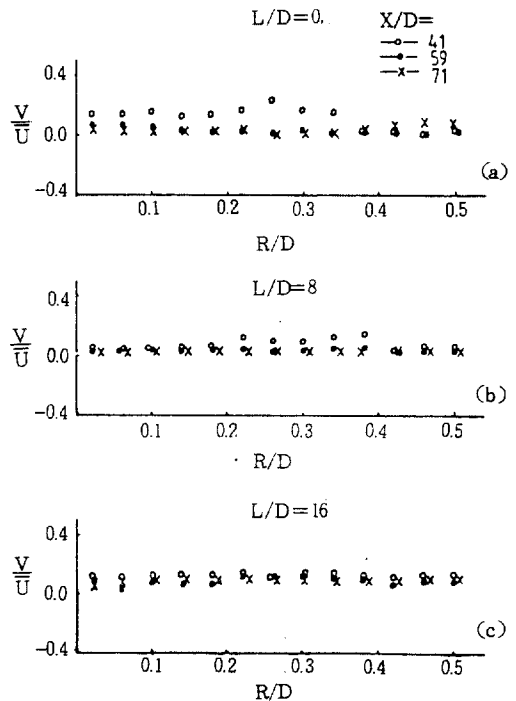


Fig.9 Experimental Radial Velocity Distributions Across the Test Tube with Swirl for  $Re = 20,000$  at (a)  $L/D = 0$ , (b)  $L/D = 8$ , (c)  $L/D = 16$

#### 4) 접선방향속도(Tangential velocity)

스윙유통의 특징은 비스윙유통에 비하여 접선방향속도와 파동속도 역시 큰 것이기도 하다.

이 속도성분이 접선방향 입구조건에서, 레이놀즈수와 시험관의 길이에 따라서 어떻게 변하는 가를 연구하였다.

Fig. 10, 11에 접선방향속도를  $Re=20,000 \sim 40,000$ 에서 구한 것을 나타내고, 접선방향

속도는 관 벽에서와 관 중심에서는 “ 0 ”의 값을 갖고, 이들 두 위치사이에서 최고치를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 스월이 소멸됨에 따라, 혹은 관의 거리( $X/D$ )에 따라 접선 방향의 속도분포가 달라지는 것을 볼 수 있다. 이들 속도분포를  $Re = 20,000$ 에서 KING<sup>17)</sup>의 결과와 Fig. 10에서 비교하였고, Fig. 11에서는 HUANG<sup>18)</sup>의 것까지도 비교하여 만족한 결과를 얻었다.

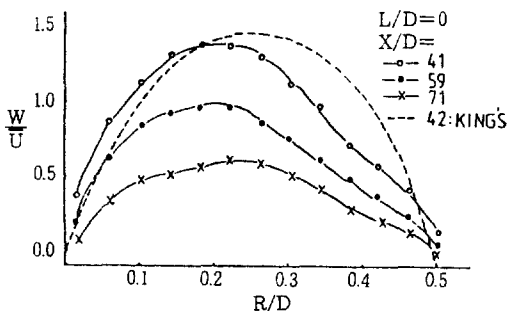


Fig. 10 Experimental Tangential Velocity Distributions Across the Test Tube with Swirl  $Re = 20,000$

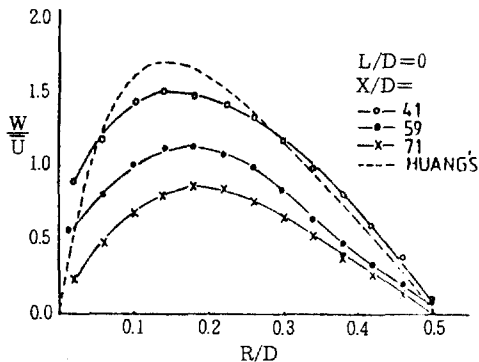


Fig. 11 Experimental Tangential Velocity Distributions Across the Test Tube with Swirl for  $Re = 40,000$

이상의 결과에서와 같이 접선방향속도 역시 레이놀즈수와 스월강도에 따라서 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

5) 스월 각(Swirl angle)

이 연구의 중요한 목적중의 하나는 스월발생기의 위치에 따라 유동각이 어떻게 변화하는가를 연구하는 것이다.

열선풍속계 프로브형 55P11을 사용하여 시험관 벽으로부터 전기적신호의 최고값을 나타내는 프로브(probe)의 위치에서 스월 각을 측정할 수 있었다.

또한 열선풍속계로 구한 축방향과 접선방향의 속도성분으로부터 식(2)를 이용하여 반경 방향의 각 위치에서 이들 각을 계산하고 프로브형 55P11으로 구한 결과와 Fig. 12에서 비교하였다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{w}{u}\right) \dots\dots\dots (2)$$

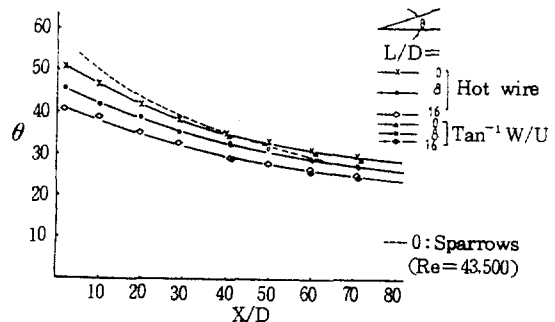


Fig. 12 Swirl Angle Distributions at  $L/D = 0.8$  and 16 for  $Re = 40,000$  (Measured Using Hot wire)

이들 결과를  $Re = 40,000$ 에서 SPARROW<sup>19)</sup>의 연구결과와도 비교하였다.

이 그림에서 스월 각은 스월 발생기의 위치나 스월의 강도에 따라 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 SPARROW<sup>19)</sup>의 결과는  $Re = 43,500$ 으로 다소 높은 값을 나타내나 시험관을 따라서 급속히 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 관경이 작은 관내에서(SPARROW의 경우 내경 23.62mm) 스월의 소멸현상이 관경이 큰 경우보다 빠르다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 13에서는 스월 각의 변화를 레이놀즈 수별로  $X/D$ 에 따라 나타내고 있다. 이 그림에서 중요한 현상은 스월 발생기 위치( $L/D = 0$ )에서 시험관입구에서의 스월 각은 모두 같으며 레이놀즈 수에 따라 스월 각이변하는 것을 나타낸다. 또한 레이놀즈 수가 증가하면 스월 각은 더 완만하게 변화하는 것을 볼 수 있다.



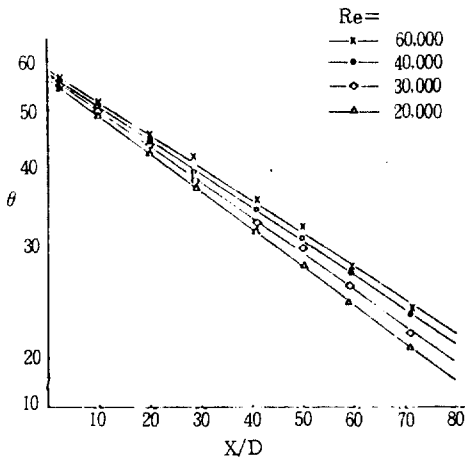


Fig.13 Logarithmic Distributions of Swirl Angle at Various Reynolds Numbers for  $L/D = 0$

6) 스윙 강도(Swirl intensity)

스윙 유동의 연구 초기에는 스윙 각으로 유동의 강도를 나타내었으나 Twist tape 를 사용하는 경우는 테잎의 길이와 실험관의 직경의 비( $H/D$ )로 스윙유동의 강도를 나타내었다.

이들 두 방법으로는 각종 스윙유동의 강도를 나타내는데 어려움이 있으므로, 1973년 YAJNIK<sup>14)</sup>는 식(3)과 같이 각 모멘텀(Angular momentum)과 축 모멘텀(Axial momentum)의 비로 스윙유동의 강도를 나타내었다.

본 연구에서는 식(3)을 이용하여  $X/D = 41, 59, 71$ 에서 스윙 강도를  $Re = 20,000, 40,000$ 에 대하여 계산하여 그 결과를 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다.

이 그림에서와 같이 스윙강도 역시 레이놀즈 수 및  $X/D$ 에 따라 변하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 15에서는 스윙강도가  $X/D = 41$ 에서 0.6 이상임을 보여주고 있다. 즉, 이 값은 LILLEY<sup>16)</sup>에 의해서 강 스윙유동(Strong swirl)로 정의되고 이 경우 관 중심에서는 소용돌이 핵(Vortex core)현상이 발생한다.(이 현상에 대한 논의는 차기 후속 논문에서 논의하고자 한다) 그러나  $Re = 20,000$ 의 경우  $L/D = 16$ 에서는  $S = 0.4$ 에서 “0”값으로 급

격히 감소함을 보여준다. 즉 접선방향속도가 “0”일때 스윙유동이 소멸됨을 나타내고 있다.

$$S = \frac{\int_0^R UWR^2 dR/R}{\int_0^R U^2 R dR} \dots\dots\dots (3)$$

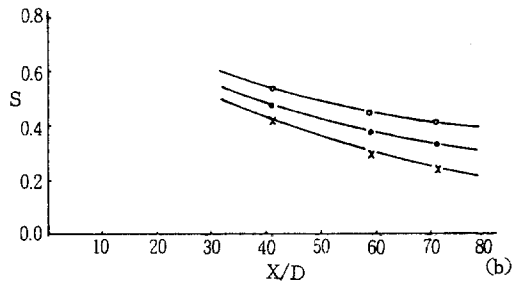
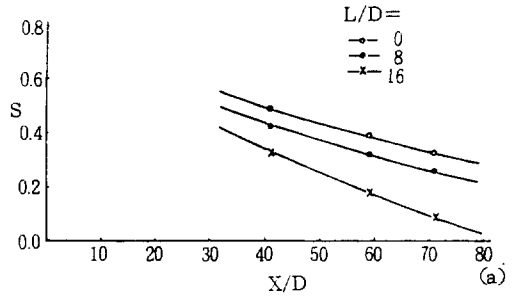


Fig.14 Distributions of the Swirl Number Along the Test Tube for (a)  $Re = 20,000$ , (b)  $Re = 30,000$

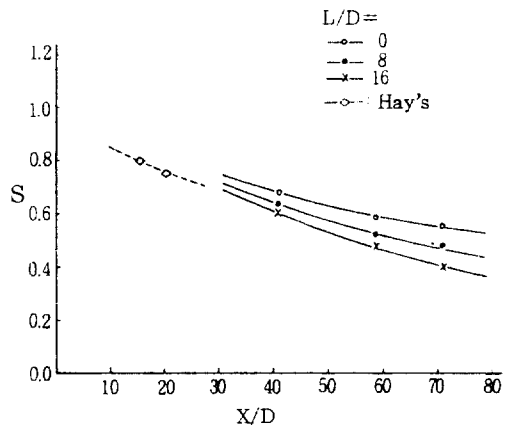


Fig.15 Distributions of the Swirl Number Along the Test Tube for  $Re = 60,000$

5. 결 론

이상과 같이 수평원통관내의 스윙유동에서 접선방향 입구조건으로  $Re = 20,000$ 과 40,000

에서 관마찰손실, 속도분포, 스월 각 그리고 스월 강도를 구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 관마찰계수 비  $f_s/f$  는 시험관입구에서는 10~13 배로 증가하나, 스월 유동이 소멸됨에 따라 감소하여 시험관 끝부분에서는 1에 접근하였다.

2) 축 방향속도(Axial velocity)는 시험관 벽근처에서 최고값을 나타내고 관 중심으로 이동할수록 부(-)의 속도를 나타내고, 시험관을 따라 이 부(-)의 속도는 감소함을 알 수 있었다.

3) 접선방향속도(Tangential velocity)는 시험관의 벽과 중심사이에서 최고값을 나타내고 관 중심에서는 "0"을 나타내었으나, 스월이 소멸되면서 최고속도의 위치가 관 중심 쪽으로 이동됨을 볼 수 있었다.

4) 반경 방향속도(Radial velocity)는 시험관을 가로질러 아주 작은 값을 나타내었다.

5) 스월 각(Swirl angle)은 시험관 입구에서 최고값을 나타내나 시험관을 따라 감소하였다. 또한 레이놀즈 수에 관계없이 시험관 입구에서 스월 각은  $55^\circ \sim 58^\circ$ 를 나타내고 스월 강도에 따라 감소하였다.

6) 축 방향과 접선 방향속도로부터 계산한 스월 강도는  $S = 0.4 \sim 0.6$  으로 관 입구에서는 강 스월유동(Strong swirl)을 나타내었고 중심부에서는 소용돌이 핵(Vortex Core) 혹은 브록크다운(Breakdown) 현상이 발생하였다.

## REFERENCE

1. TALBOT L., 1954, "Laminar Swirling flow", J of Applied Mechanics, ASME, Vol.21., pp.1-7.
2. BINNIE A.M. and TEARE J.D., 1957, "Experiments on the flow of swirling water through a pressure nozzle and an open trumpet", Quart, J. MECH and Applied Math., Vol.10., Part 3. pp.78-89.
3. ROBERT C. CHANAUD., 1965, "Observation of Oscillatory motion in certain Swirling flows", J. of Fluid mechanics., ASME, Vol.21., pp.111-127.
4. CHIGIER A.N. and BEER J.M., 1964, "Velocity and Static-pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles", ASME, J. of Basic Engineering., pp.788-796.
5. ROSE G.W., 1962, "A Swirling round Turbulent Jet 1-Mean flow Measurements", ASME, J. of Applied Mechanics., pp. 615-625.
6. WOLF Jr., LAVAN Jr. and FEJER A.A., 1969, "Measurement of the decay of swirl in Turbulent flow", AIAA., pp. 971-973.
7. WESKE R.D. and STUROV YE.G., 1974, "Experimental study of Turbulent swirling flows in cylindrical tube", Fluid Mechanics - Soviet reserch., Vol.3, No.1, pp.77-82.
8. HABIB A.M. and WHITELOW H.J., 1980, "Velocity characteristics of confined coaxial Jets with and without Swirl", ASME, J. of Fluid Engineering, Vol.102, pp.47-53.
9. KOMORI S. and UEDA H., 1985, "Turbulent flow structure in the mean field of a swirling round free Jet", Phys. fluids. Vol.28, pp.2075-2082.
10. SISLIAN P.J. and CUSWORTH R.A., 1986, "Measurements of mean velocity and Turbulent Intensities in a Free Isothermal swirling Jet", AIAA. Vol.24, No.2, pp.303-309.
11. ARIVELLIS M., 1977, "Hot-wire measurements in flows of Low and High Turbulence Intensity", DISA Information No.22, pp.15-20.
12. CHANG T.H., 1989, "Measurement of air velocity using a slanted Hot-wire", SAREK Vol.1, pp.21-31.
13. SPARROW E.M. and CHABOKI A., 1984, "Swirl-Affected Turbulent fluid flow and

- Heat transfer in a circular tube”, J. of Heat-transfer ASME. Vol.106, pp.766-773.
14. MURAKAMI M., KITO O., KATAYAMA Y. and IIDA Y., 1976, “An experimental study of swirling flow in pipes”, Bulletin the JSME. Vol.19, No.128, pp.118-126.
  15. YAJNIK K.S. and SUBBALAH, 1973, “Experiments an swirling turbulent flows, part 1, similarity in swirling flows”, J. of Fluid mechanic, Vol.60, pp.665-687.
  16. LILLEY D.G., 1973, “Prediction of insert Turbulent swirl flows”, AIAA J., Vol.11, No.7, pp.955-960.
  17. KING M.K., ROTHFUS R.R. and KERMODE R.I., 1969, “Static pressure and velocity profiles in Swirling Incompressible tube flow”, AICHE J., Vol.15, No.6, pp.387-843.
  18. HUANG F. and TSOU F.K., 1979, “Friction and Heat Transfer in Turbulent Free Swirling Flow in a pipes”, ASTM, N 79-HT-39.