

## 직관덕트내에서 정상유동, 진동유동과 맥동유동의 임계레이놀즈수에 관한 연구

박 길 문\* · 봉 태 근\*\*

A Study on the Critical Reynolds Number of Steady,  
Oscillatory and Pulsating Flow in a Straight Duct

G. M. Park · T. G. Bong

**Key words** : Unsteady Flow(비정상유동), Transitional Flow(천이유동), Critical Reynolds Number(임계레이놀즈수), Velocity Waveform(속도파형)

### Abstract

The critical Reynolds number in a square-sectional straight duct is investigated experimentally. The experimental study for the air flow in a square-sectional straight duct is carried out to classify critical Reynolds number on steady flow and unsteady flow. To classify the critical Reynolds number we obtained velocity waveform by using a hot-wire anemometer and data acquisition system with photocorder.

### Nomenclature

$A_p$  : Amplitude of piston movement  
 $a$  : Duct half-width (mm)  
 $b$  : Duct half-height (mm)  
 $D_h$  : Hydraulic diameter(=  $4ab/(a+b)$ )  
 $f$  : Frequency of oscillation  
 $Re$  : Reynolds number(=  $D_h \cdot \bar{u}_m/\nu$ )  
 $Re_{st}$  : Reynolds number of steady flow  
 (=  $D_h |\bar{u}_{m,st}|/\nu$ )

$Re_{os}$  : Reynolds number based on cross-sectional mean velocity amplitude of oscillatory flow(=  $D_h |\bar{u}_{m,os}|/\nu$ )  
 $Re_{ta}$  : Time-averaged Reynolds number of pulsating flow(=  $D_h \bar{u}_{m,ta}/\nu$ )  
 $u, v, w$  : Velocity components in x, y and z-axis, respectively  
 $u', v', w'$  : Dimensionless velocity components in x, y and z-axis, respectively  
 $u_{cl}$  : Velocity at center of duct

\* 조선대학교 공과대학 기계공학부 (원고접수일 : 97년 4월)  
 \*\* 목포해양대학교 기관공학부

- $\bar{u}_m$  : Cross-sectional mean velocity
- $\bar{u}_{m, st}$  : Cross-sectional mean velocity of steady flow
- $\bar{u}_{m, os}$  : Cross-sectional mean velocity of oscillatory flow
- $\bar{u}_{m, ta}$  : Time-averaged cross-sectional mean velocity of pulsating flow
- x, y, z : Rectangular coordinates of test section
- $y'$  : ( $=y/a$ )
- $z'$  : ( $=z/b$ )
- $\omega$  : Angular frequency ( $=2\pi f$ )
- $\omega'$  : Dimensionless angular frequency ( $=D_h/2 \cdot \omega/\nu$ )

## 1. 서 론

유체유동에 대해서, 층류유동과 난류유동에 관한 연구는 일반적으로 활발하게 이루어지고 있으나 천이유동에 관한 연구<sup>(1)</sup>는 아직까지 충분하게 이루어지지 않고 있으며 원형단면을 가진 직관덕트에 관한 것이 대부분이다. 또한, 정상유동에 관한 연구는 많으나, 비정상유동에 대한 연구는 많지 않다. Hino 등<sup>(2)</sup>은 완전발달된 원형단면직관내의 유동영역에서 층류진동유동의 천이현상과 임계레이놀즈수를 결정하는 실험을 하였고, Ohmi 등<sup>(3,4,5,6)</sup>은 원형단면직관에서 진동유동의 유동형태, 마찰손실, 임계레이놀즈수, 속도분포, 천이현상 그리고 입구길이를 결정하는 연구내용을 발표하였으며, Ohmi 등<sup>(7)</sup>은 직4각 단면덕트에서 진동유동의 속도분포와 천이현상에 대해서, 최<sup>(8)</sup>등은 정4각 단면덕트에서 천이진동유동의 임계레이놀즈수 및 전단응력분포에 대해서 발표하였다. 맥동유동에 대해서 Iguchi 등<sup>(9)</sup>은 원관내 맥동유동의 층류유동, 천이유동 및 난류유동의 존재범위와 난류의 발생과 소멸을 규정하는 조건에 대하여, 유<sup>(10)</sup>는 정4각 단면덕트의 입구영역에서 천이비정상유동의 유동특성변수에 관한 논문을 발표하였다. 또한 Sarpkaya<sup>(11)</sup>는 맥동유동의 임계레이놀즈수의 결정에 대해서 연구를 했다. 본 논문에서는 곡관이 연결된 직관덕트의 완전 발달된 유동영역에서 정상유동, 진동유동, 맥동유동의 유동현상을 정온열

선유속계에서 얻어진 속도파형을 광기록계에 기록해서 층류유동, 천이유동, 난류유동의 유동영역으로 분류하고 임계레이놀즈수를 결정하여 유체유동의 특성을 고찰하였다.

## 2. 실 험

### 2. 1 실험장치

시험덕트는 입구측에 길이가 4000mm이 고덕트 단면의  $2a \times 2b = 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 인 정4각 단면덕트와 곡률반경이 400mm이고 단면덕트는 동일한 U자형의 180° 곡관부를 연결하고 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트를 매끄러운 아크릴로 제작하였으며 덕트입구에는 유입관(inlet bell-mouth)을 설치하였다. 그리고 실험실내의 공기의 흐름에 영향을 받지 않도록 시험덕트의 유입관에 무풍상태 상자(500mm × 500mm × 1000mm)를 설치하여 하단의 공기유입구(500mm × 500mm × 200mm)를 통하여 공기가 유입하도록 하였다. 시험덕트는 열선유속계의 열선지지대를 삽입하기 위하여 직경 5.4mm의 구멍을 덕트 중심선상( $y' = 0$ )을 따라 덕트 윗면에  $5D_h$ 의 등간격으로 구멍을 뚫었다. 작동유체로는 공기를 사용하였고, 정상유동은 송풍기로 공기를 흡입하여 시험덕트내로 유입하도록 하여 발생시켰고, 진동유동은 유량제어 밸브를 잠근 상태에서 송풍기를 정지하고, 스코치-요크형 가진기만을 작동하여 발생시켰고, 맥동유동은 정상유동과 진동유동을 혼합하여 발생시켰다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었는데, 정상유동의 경우에 흡입된 공기는 입구측 직관부를 거쳐 180° 곡관부, 출구측 직관부, 서지탱크

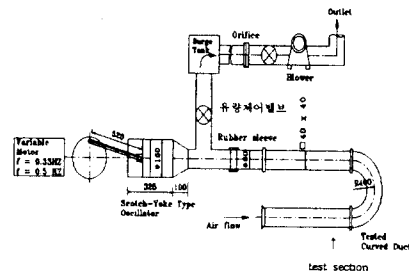


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

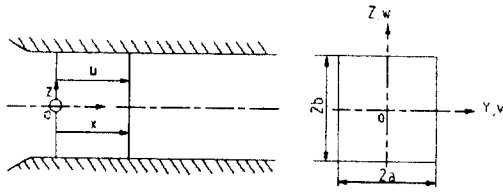


Fig. 2 Coordinate system and velocity components in a straight duct

를 지나 배출된다. 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2와 같이 정하였다. 시험덕트내의 유동속도를 측정하기 위하여 시험덕트에 열선을 삽입하여 정온열선 유속계(Hot-wireanemometer)와 광기록계(photocorder)를 이용하여 측정하였다.

### 2. 2 실험방법

시험덕트내의 유동속도를 측정하기 위하여 시험덕트에 열선을 삽입하여 열선으로 부터 얻어진 신호는 정온열선유속계의 선형기(linearizer)를 지나 광기록계에 속도파형을 기록하였다. 측정위치는 직관부의 완전 발달된 영역으로 판단되는 입구 측 직관덕트의  $x/D_h$ 가 80인 지점중에서,  $y'$  와  $z'$  가 0인 덕트의 중앙에서 속도파형을 측정하였다. 정상유동은 송풍기에 의하여 공기를 흡입하여시험덕트내로 유입되도록 하였고, 시험덕트의 유속조절은 송풍기의 회전수와 유량제어밸브로 조절하여 유속을 변화시켰다. 정상유동은 광기록계의 속도파형이 완전 층류유동영역에서부터 속도를 점차적으로 증가시켜서 속도파형이 완전히 난류가 될 때까지 측정하였고, 진동유동은 스코치-요크형 가진기에 연결된 변속모터에 의하여 진동주파수(f)를, 회전원판에 의하여 피스톤의 행정(Ap)을 변화시켜 가면서 광기록계에 나타난 진동유동의 속도파형이 완전 층류유동영역에서부터 진동유동의 레이놀즈수를 점차적으로 증가시켜 가면서 완전한 난류진동유동이 될 때까지 측정하였다. 맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동이므로 진동주파수를 0.5 Hz, 행정을 40mm로 고정한 후, 유량제어밸브로 유속을 높혀가면서 광기록계의 맥동유동의 속도파형이 완전 층류유동영역에서부터 맥동유동의 레이놀즈수를 점차적으로 증가시켜 가면서 완전히 난류가 될 때

까지 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3. 1 정상유동

층류유동에서 천이유동, 난류유동으로의 발달 과정은 단조롭지 않아서, 선단부의 정상층류유동이 2차원 Tollmien - Schlichting Wave를 갖는 불규칙한 3차원 파형으로 발달하여 와류가 형성되었다. 국소 와류속도가 매우 높은 곳에서는 난류성분이 발생하고, 난류속도변동이 큰 위치에서는 난류 스포트가 형성되어, 난류 스포트들이 합하여져서 비로소 완전히 발달된 난류유동이 형성되는데, 불규칙한 층류유동으로부터 완전히 발달된 난류유동전까지를 총괄하여천이유동영역(transitional flow region)이라 하고, Fig. 3에 정상유동의 층류유동영역에서 난류유동영역까지의 속도파형을 나타내었다. Fig.3에서, 정상유동의 레이놀즈수가 2100인 부근에서 임계유동이 시작되어 2600 부근에서 완전한 난류유동이 형성되고 있었다. Fig. 3에서, 레이놀즈수가 2100인 부근 부터 2600 까지를 천이유동영역으로 볼 수 있었다. 다음과 같은 식으로 천이정상유동의 임계레이놀즈수를 결정하였다.

$$Re_{st,cr} = D_h \cdot \bar{u}_{m,st} / \nu \quad (1)$$

### 3. 2 진동유동

Fig. 4에 진동유동의 층류에서 난류까지의 속도파형을 나타내었다. 경계층이 발달하여 발생하는 Slug식 유동으로 인하여 층류유동, 천이유동 및 난류유동으로 분류되는 유동형태는 속도파형을 관찰하여 분류하였는데, 이들 3영역의 경계는 진동유동의 레이놀즈수( $Re_{os}$ )와 무차원각진동수( $\omega'$ )와의 함수관계로 표현되며 속도파형에서 난류성분이 감속영역의 최대진폭 부근에서 최초로 발생한다. 감속영역의 최대진폭부근에서 최초로 발생한 난류성분은 진동유동의 레이놀즈수가 증가함에 따라 성장되어 난류부근에서는 가속유동의 초기 위상을 제외한 전주기에 걸쳐 나타났다. Fig. 4의

속도파형으로부터 진동유동의 레이놀즈수가 1300인 부근에서 임계유동이 시작되어 완전히 난류가 형성되는 3700인 부근까지는 천이유동영역으로 볼 수 있었다. 진동유동의 단면평균속도  $|\bar{u}_{m,os,1}|$ 는  $(A_p/2)\omega \frac{A_{piston}}{A_{duct}}$  로 하여 피스톤진폭으로부터 계산하였고, 진동유동속도를 유입유동과 유출유동으로 나누어서 Fourier급수에 의하여 6차의 고주파성분까지의 진폭과 위상각을 계산하였다. 즉, 유입유동에 대하여 1주기 당 12개의 데이터를 입력하여 6차 성분까지 계산하여 Fourier급수의 근사식을 구하였고, 유출유동도 같은 방법으로 계산하였다. 임계레이놀즈수는 다음과 같은 식에 의하여 결정하였다.

$$Re_{os,cr} = D_h |\bar{u}_{m,os,1}| / \nu \quad (2)$$

### 3.3 맥동유동

천이맥동유동은 층류성분과 난류성분이 공존하는 영역으로 가속영역에서는 층류성분이 나타나고 감속영역에서는 난류성분이 나타나는 천이맥동유동영역 상태를 유지하고 있다. 덕트의 중심에서 벽면쪽으로 갈수록 그리고 하류방향으로 갈수록 감속위상에서 난류성분이 많이 나타나고 있고, 시간평균레이놀즈수가 증가할수록 감속위상에 난류성분이 많이 나타나고 있다. 여기에서 맥동유동의 기본파형을 얻기 위해서 진동유동의 레이놀즈수와 무차원각진동수를 고정시키고 시간평균레이놀즈수를 변화시켜가면서 속도파형을 얻었다. Fig.5에는 층류로부터 난류까지의 맥동유동의 속도파형의 변화를 기록하였다. 진동유동의 레이놀즈수를 2000으로 고정했을 때, 시간평균레이놀즈수가 2000부근에서 임계유동이 나타나기 시작하여 천이유동의 현상이 나타났고, 시간평균레이놀즈수를 점차적으로 증가시켜 2500 부근에서 완전한 난류맥동유동으로 변화되었다. 층류맥동유동에서 천이맥동유동으로 변화되어 가는 순간난류성분이 나타나기 시작한 임계유동의 속도를 계산하여 덕트내의 맥동유동에 대한 임계레이놀즈수를 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$Re_{ta,cr} = D_h |\bar{u}_{m,ta}| / \nu \quad (3)$$

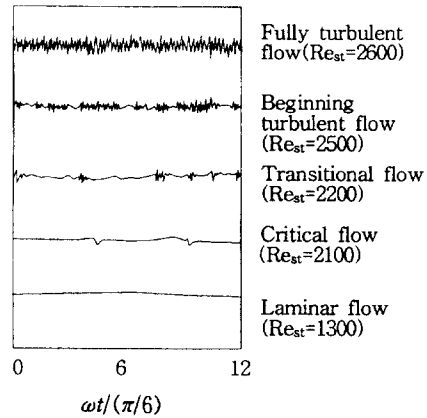


Fig. 3 Velocity waveforms of steady flows in a straight duct ( $x/D_h=80, y'=0$  and  $z'=0$ )

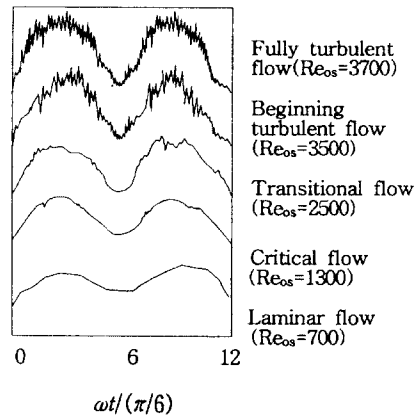


Fig. 4 Velocity waveforms of oscillatory flows in a straight duct ( $x/D_h=80, y'=0$  and  $z'=0$ )

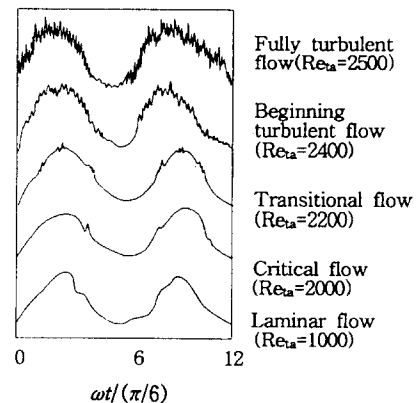


Fig. 5 Velocity waveforms of pulsating flows in a straight duct ( $x/D_h=80, y'=0$  and  $z'=0$ )

#### 4. 결 론

직관덕트에서 열선유속계와 광기록계를 이용하여 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정상유동에서 층류정상유동에서 천이정상유동으로 변화되는 임계레이놀즈수( $Re_{st,cr}$ )는 2100 정도였고, 천이정상유동에서 난류정상유동으로 변화되는 임계레이놀즈수는 2500 정도였으며 2600 정도에서 완전한 난류유동이 나타났다. 이 실험결과는 Ohmi 등<sup>(4)</sup>이 발표한 결과와 비교적 잘 일치하였다.

2) 진동유동에서 층류진동유동에서 천이진동유동으로 변화되는 임계레이놀즈수( $Re_{os,cr}$ )는 1300 정도였고, 천이진동유동에서 난류진동유동으로 변화되는 임계레이놀즈수는 3500 정도였으며 3700인 부근에서 완전한 난류진동유동이 형성되었다. 이는 Ohmi 등<sup>(6)</sup>이 직관덕트에 관해 발표한  $400\omega'$ ,  $780\omega'$  와 유사한 결과를 나타내었다.

3) 맥동유동의 시간평균 임계레이놀즈수( $Re_{ta,cr}$ )는 진동유동의 레이놀즈수를 2000으로 고정했을 때 층류맥동유동에서 천이맥동유동으로 변화되는 시간평균 임계레이놀즈수( $Re_{ta,cr}$ )는 2000 정도였고, 천이맥동유동에서 난류맥동유동으로 변화되는 시간평균 임계레이놀즈수는 2400 정도였으며 2500인 부근에서 완전한 난류맥동유동이 형성되었다. 이는 Iguchi 등<sup>(9)</sup>이 발표한 맥동유동의 분류에 대한 결과와 비교적 잘 일치하였다.

#### 후 기

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 대하여 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참 고 문 헌

1) J. J. Wynanski and F. H. Champagne, 1973,

"On Transition in a Pipe. Part1. The Origin of Puffs and Slugs and the Flow in a Turbulent Slug," J. Fluid Mech. Vol. 59, part 2, pp. 281~335.

2) Hino, M., M. Sawamoto and S. Takasu, 1976, "Experimental on Transitional to Turbulence in an Oscillatory Pipe Flow," J. Fluid Mech. 75, pp. 193~207.

3) M. Ohmi and M. Iguchi, 1982, "Critical Reynolds Number in an Oscillating Pipe Flow" JSME, Vol. 200, pp. 165~172.

4) M. Ohmi and M. Iguchi, 1982, "Occurrence of Turbulent Bursts in an Oscillating Pipe Flow," Technology reports of the Osaka University, Vol. 32, pp. 113~120.

5) M. Ohmi and M. Iguchi., 1982, "Transition to Turbulence and Velocity Distrubution in an Oscillating Pipe Flow," JSME, Vol. 25, No. 201, pp. 365~371.

6) 近江 宗一, 井口 學, 赤尾 不二雄., 1984, "長方形管内振動流れの亂流遷移と速度分布," 日本機械學會論文集, 제447호 編, pp. 2343~2353.

7) M. Ohmi, M. Iguchi and F. Akao., 1984, "Laminar Turbulent Transition and Velocity Profiles of Oscillatory Rectangular Duct Flow," Bull. JSME 27, PP. 1399~1406.

8) 최주호, 박길문, 1989, "정4각단면덕트내에서 천이진동유동의 임계레이놀즈수 및 전단응력분포," 순천대학 농업과학연구 제3집, pp. 69 ~ 81.

9) 井口 學, 近江 宗一, "圓管内脈動流れの亂流遷移に關する研究," 日本機械學會論文集 제449호, B 편, pp. 36 - 44.

10) 유영태, 1989, "덕트 입구영역에서 정상유동, 진동유동과 맥동유동의 천이 유동특성에 관한 연구," 조선대학교, 박사학위논문.

11) T. Sarpkaya, "Experimental Determination of the Critical Reynolds Number for Pulsating Poiseuille Flow," J. of Basic Engineering, pp. 589 ~598.