

## 곡관덕트에서 LDV를 이용한 천이정상유동의 유동특성에 관한 연구( I )

봉 태 근\* · 박 길 문\*\*

### A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady Flows in a Curved Duct by Using Laser Doppler Velocimeter ( I )

T-G Bong\* and G-M Park\*\*

**Key words** : Transitional Steady Flow(천이정상유동), Dean Number(던수), Axial Velocity Profiles(축방향 속도분포)

#### Abstract

In this paper, an experimental investigation of characteristics of developing transitional steady flows in a square-sectional 180° curved duct is presented. The experimental study is carried out to measure axial velocity profiles by using Laser Doppler Velocimeter (LDV) system. The flow development is found to depend upon Dean number and curvature ratio.

For transitional steady flows, the maximum velocity position of axial velocity profiles begins to incline toward the outer wall from  $\phi=30^\circ$  bended angle, velocity profiles in center of the duct have lower value than those of the inner and outer walls because of the centrifugal forces.

#### 기호설명

De : Dean number  
 $(=Re\sqrt{a/R}=Re\sqrt{\frac{D_h}{2R}}=\sqrt{D_h/2R} \cdot (D_h \cdot \bar{u}_m/v))$   
 $R_c$  : Curvature ratio( $=\frac{a}{R}=\frac{D_h}{2R}$ )  
 $Re$  : Reynolds number

$u, v, w$  : Velocity components in  $x, y$  and  
 $z$ -axis, respectively  
 $cl$  : Value of duct center-line  
 $\phi$  : Deflection angle of duct

#### 1. 서 론

곡관은 열교환기나 화학반응장치 등에 이용되

\* 목포해양대학교 기관공학부(원고접수일 : 2000년 7월)

\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과

어 공학적으로 중요한 요소이므로 지금 까지 많은 연구가 진행되어 왔다.

곡관덕트유동에서 정상유동에 관한 기존 연구들을 살펴보면 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1910년에 Eustice<sup>(1,2)</sup>는 곡관로내의 유동은 직관로에 비하여 압력손실이 크며 나선형 유동을 한다는 것을 지적하였으며 Humphrey<sup>(3,4)</sup> 등은 Dean수가 368정도에서 실험적인 연구로 유동을 가시화하여 유동특성을 규명하였고, 레이저유속계를 이용하여 속도를 측정하였다. Akiyama<sup>(5~8)</sup> 등은 유동의 가시화 실험을 통해 주유동과 2차유동의 발달을 가시화하였고 속도분포를 정량화하였다.

본 연구에서는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 입구영역에서 LDV시스템을 이용하여 실험을 하였다. 유동영역을 분류하여 임계단수를 결정하였고, 천이정상유동의 축방향 속도분포를 측정하여 180곡관덕트의 입구영역에서 단수와 곡관덕트의 굽힘각이 축방향속도분포에 미치는 영향과 유동특성을 규명하였으며, 2차유동에 대한 연구는 추후 발표할 예정이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 변속모터에 연결된 스코치-요크형 가진기, 송풍기 등으로 구성되어 있다. 이중 스코치-요크형 가진기는 진동유동 및 맥동유동을 발생시키는데 사용하고, 정상유동은 송풍기를 이용하여 발생시켰다. 180° 곡관덕트는 아크릴로 제작하였고, 입구측에는 단면의 크기가 40mm×40mm이고 길이가 4000mm인 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고 직관덕트와 단면크기가 같은 180° 곡관덕트를 연결한 다음, 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트를 연결하였다. 곡관덕트내의 축방향유동과 2차유동의 측정은 LDV를 이용하였는데, 이 LDV 시스템은 최대출력 2W인 Ar-Ion 레이저이고, 광학계의 배치는 2중빔 형식이며 2색 3빔 방식의 후방산란형이다. LDV 시스템을 적재하여 이동하기 위하여 3차원 이송장치를 설치하였다.

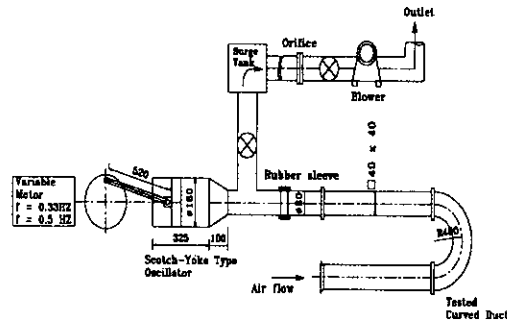


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

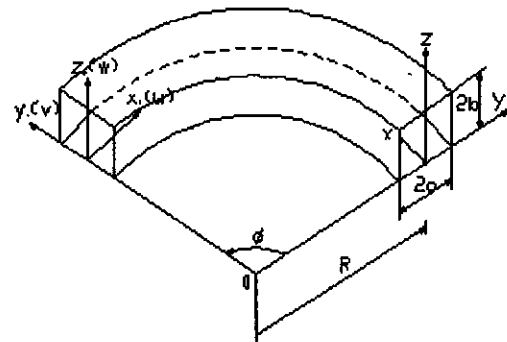


Fig. 2 Coordinate system and velocity components in a curved duct

실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2에 각각 나타내었다.

### 2.2 실험방법

천이정상유동은 송풍기에 의하여 공기를 흡입하여 시험덕트내로 유입하도록 하였고 시험관의 유속조절은 유량제어밸브 또는 송풍기를 구동하는 변속모터의 회전수를 조절함으로써 유속을 변화시켰다. 산란입자로는 입자 크기가 0.1~0.3μm 인 모기향 연기를 사용하였다.

천이정상유동의 실험범위는 덕트 중심에서 열선으로 나오는 신호가 열선유속계를 지나 광기록계에 기록된 속도파형을 고찰하여 최초의 난류버스트가 발생하는 곳으로부터 완전한 난류가 형성되는 부근까지를 천이유동영역으로 규정하고 그 영역에서 실험을 하였다. 본 실험에서는 단수를 460과 530으로 하여 측정하였고, 유량은 오리피스로 측정하여 이로부터 단면평균속도를 구하여 단

수를 계산하였다.

측정 위치는 180도 곡관중에서 0°, 30°, 60°, 90° 까지 30° 등간격으로 4지점만을 측정하였다.

곡관덕트내에서 천이정상유동의 유동특성에 대한 유동형태를 정확히 고찰하기 위하여 z 방향보

다는 y 방향의 속도분포가 곡관의 굽힘 때문에 심한 변화를 보일 것으로 예상되어 z 방향은 7 지점, y 방향은 11 지점을 측정하였다.

천이정상유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험 값을 시그널 프로세서를 거쳐 PC에서 FIND 소프트웨어에 의하여 속도 값으로 처리되어 데이터 파일로 정리하여 ORIGIN 프로팅 소프트웨어에 의하여 그렸다.

Table 1은 천이정상유동의 실험조건을 나타낸 것이다.

Table 1. 천이정상유동의 실험조건

Angle	De <sub>st</sub>	Radius of curvature(mm)
0°	460	400
	530	
30°	460	400
	530	
60°	460	400
	530	
90°	460	400
	530	

### 3. 축방향 속도분포

곡관덕트의 입구영역에서 유체유동이 하류방향

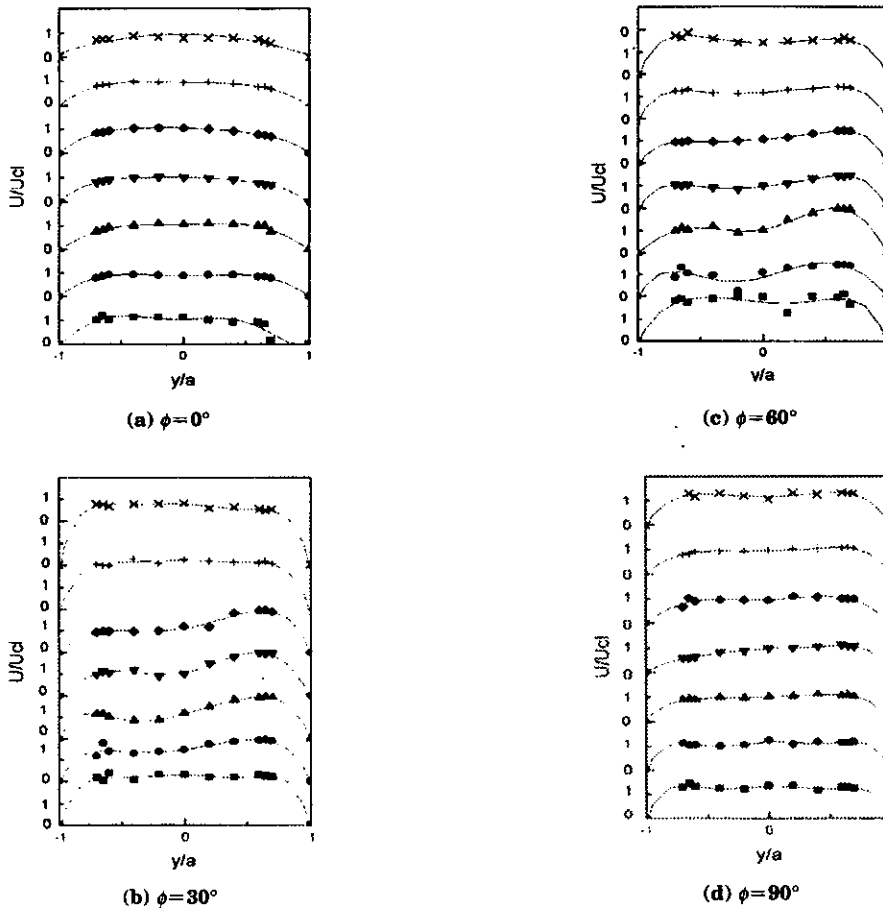


Fig. 3 Axial velocity distributions along axial direction in a curved duct for transitional steady flow at  $De_{st} = 460$  (관저로부터의 거리, x : 35mm, + : 30mm, ◆ : 25mm, ▼ : 20mm, ▲ : 15mm, ● : 10mm, ■ : 5mm)

으로 진행함에 따라 점성의 영향을 받는 영역과 받지 않는 영역이 존재한다. 입구영역에서 유체가 하류방향으로 진행하면 입구에서부터 경계층이 발달하지만 질량유량은 항상 같아야 하므로 중앙에서의 속도는 증가되는 반면에 벽면근방의 속도는 감소된다. 곡관덕트의 입구 유동영역은 경계층영역과 경계층박의 영역으로 분류되며 단수가 증가하면서 압력구배와 점성력으로 인하여 유동이 층류유동, 천이유동, 난류유동의 상태로 변한다. 덕트의 모서리효과(corner effect)는 긴 타원형 형식이기 때문에 국소효과만이 존재한다.

Fig. 3의 (a), (b), (c), (d)는 곡관덕트에서  $De_{st}$ 가 460인 경우에 덕트의 무차원 횡단면 위치인  $y/a$  방향에 따른 축방향 속도분포를 덕트 중심에서의 속도

( $Ucl$ )로 나누어 무차원화하여 곡관덕트의 굽힘각을  $30^\circ$  간격으로 나타낸 것이다. 직관을 거쳐서 유입된 유동은 곡관의 입구인  $0^\circ$  지점에서는 거의 좌우가 대칭인 속도분포를 나타내고 있으나 관저충부분에서 곡관의 굽힘 영향이 나타남을 관찰할 수 있다. 유체가 포물선의 속도분포로 곡관에 유입하면 단면의 중심부분에서 원심력이 최대가 되고 이것이 유체의 점성마찰이나 압력과 균형을 유지한 축방향 속도분포를 형성한다.  $30^\circ$  되는 지점에서는 관의 굽힘의 영향으로 인한 원심력때문에 최대 유속의 위치가 외벽쪽으로 기울기 시작하여 곡관덕트의 외벽쪽으로 갈수록 속도가 점점 증가하고 있고, 또한 주류가 외벽쪽으로 이동함에 따라 축방향 속도분포는 좌우 양단면에서 최대치를 갖고, 중

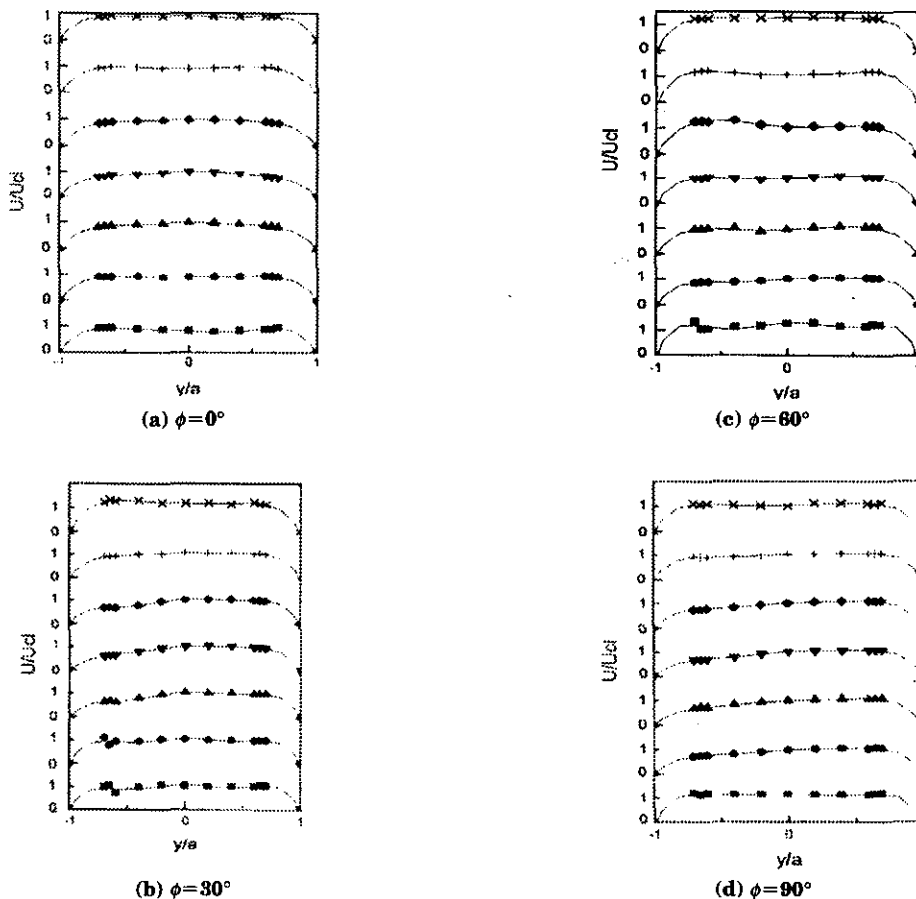


Fig. 4 Axial velocity distributions along axial direction in a curved duct for transitional steady flow at  $De_{st}=530$  (관저로부터의 거리,  $\times$  : 35mm,  $+$  : 30mm,  $\blacklozenge$  : 25mm,  $\blacktriangledown$  : 20mm,  $\blacktriangle$  : 15mm,  $\bullet$  : 10mm,  $\blacksquare$  : 5mm)

심부에서 최소로 된다. 즉 관내 주위 가까이의 유체를 내버려두므로 주류 중심부의 유체는 원심력으로 바깥 주위로 밀리게 되는 결과로 관중양부에는 주류 자신이 극소치를 갖는 애뉴러형의 속도분포를 갖는 현상을 하고 있다. 이것은 작은 운동량을 가진 경계층내의 유체가 2차유동에 의해 내벽부근을 통하여 운반되어, 외벽측을 향하여 압박하여 유동하기 때문이다. 이러한 현상은 60°에서도 지속되고 있으나 덕트의 상층부에서는 안정화되어 가고 있음이 뚜렷해 진다. 90°에서는 입구길이에 가까워지는 지점이어서 유동 자체가 거의 안정되어 가고있음을 고찰할 수 있다.

Fig. 4의 (a), (b), (c), (d)는  $De_{st}$ 가 530인 경우의 축방향속도분포를 나타내고 있는데,  $De_{st}$ 가 460인 경우에 비해 점성력에 비해 관성력이 우세해져서 점성력의 영향이 점차 적어지고, 속도분포도 안정화되어 감을 알 수 있다. 덕트내에서의 속도분포도 덕트 상하면에서 속도파형이 일정해지고 있다.

0° 지점에서는 전반적으로 일정한 속도분포를 나타내고 있으나 관저층에서 곡관의 굽힘 영향이 보이기 시작하고 있고, 30° 지점에서는 최고속도가 외벽쪽으로 기울기 시작하나,  $De_{st}$ 가 460인 경우에 비해 내외벽 사이의 속도분포차가 적어지고 있다. 60° 부근에서는 애뉴러현상이 나타나나  $De_{st}$ 가 460인 경우에 비해 미약하고, 90° 부근에서는 z방향의 유동변화가 점차 적어짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

정4각단면 180° 곡관덕트에서 천이정상유동의 유동특성을 규명하기 위해 실험적연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천이정상유동의 축방향 속도분포는 입구로부터 굽힘각( $\phi$ )이 30° 지점에서부터 최대유속의 위치가 외벽측으로 이동하는 현상이 뚜렷이 나타나기 시작하였고, 중심부의 유체는 원심력으로 외벽측으로 밀리게 되어, 관중양부에는 주류 자신이 극소치를 갖는 애뉴러 형의 속도분포를 갖는 현상을 고찰 할 수 있었다. 입구길이에 가까워지는 굽힘각( $\phi$ )이 90° 지점에서는 점차적으로 속도분포가 안정되어 갔다.

2.  $De_{st}$ 가 460인 경우에 비해  $De_{st}$ 가 530인 경우가 점성력이 관성력보다 커지므로 점성력의 영향을 덜 받게되어 속도분포도 일정하고 안정되어감을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 1999년도 목포해양대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 대하여 감사의 뜻을 포함합니다.

#### 참고문헌

- (1) Eustice, J., 1910, "Flow of Water in Curved Pipes", Proc. R. Soc, Ser. A. 84-568, pp. 107~118.
- (2) Eustice, J., 1911, "Experiments on Stream-line Motion in Curved Pipes", Proc. R. Soc, Ser. A. 84-576, pp 119~131.
- (3) Humohery, J. A., Taylor, A. M. K., Whitelaw, J. H. 1977, "Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature", J. Fluid Mech, Vol. 83, part. 3, pp. 509~527.
- (4) Humphery, J. A., Iacovides, H., and Launder, B. E. : "Some Numerical Experiments on Developing Laminar Flow in Circular-Sectioned Bends",
- (5) Akiyama, M., Kikuch, K., Suzuki, M., Nishiwaki, I., Cheng, K. C., and Nakayama, J., 1981, "正方形曲り管内の層流助走區間に關する解析と可視化實驗", 日本機械學會論文集(B編), 47卷 422號, pp. 1961~1970.
- (6) Akiyama, M., Takamura, S., Cheng, K. C., Suzuki, M., and Nishiwaki, I., 1984, "曲り圓管内層流助走區間流れに關する研究(第一報.入口速度分布による發達の相違)", 日本機械學會論文集(B編), 50卷 452號, pp. 990~998.
- (7) Akiyama, M., Hanaoka, Y., Cheng, K. C., Urai, I., and Suzuki, M., 1984, "曲り圓管内層流助走區間流れに關する研究(第2報, 速度分布の可視化による測定)", 日本機械學會論文集(B編), 50卷 449號, pp. 286~292.
- (8) Akiyama, M., Suzuki, M., Cheng, K. C., Suzuki, M., and Nishiwaki, I., 1984, "Mixed Convection

Problems in the Entrance Region of Curved Circular Tubes”, 日本機械學會論文集(B編), 50卷 452號, pp. 1197~1204.

**지 자 소 개**



**봉태근(奉泰根)**

1956년 3월생. 1978년 목포해양대학교 기관과졸업. 1989년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1982년~현재 목포해양대학교 기관공학부 부교수.



**박길문(朴吉文)**

1946년 3월생. 1974년 조선대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1977년~현재 조선대학교 기계공학과 교수