

〈論 文〉

층류 박리된 관유동에 관한 실험적 연구

이 상 준*

(1990년 2월 13일 접수)

An Experimental Study on Laminar Separated Pipe Flow

Sang Joon Lee

Key Words : Pipe Flow(관 유동), Separation and Reattachment(박리 및 재부착), Blockage Ratio(막힘비), NMR Flow Image(NMR 유속영상), Velocity Field(속도장), Flow Visualization(유동가시화)

Abstract

The three dimensional laminar, separated pipe flow associated with the presence of a segmental orifice in a circular pipe has been studied experimentally. The velocity fields of the separated and reattachment regions were measured using a NMR-CT flow imaging technique and were compared with flow visualization results. Three different blockage ratio's (R) were employed, and characterised by a ratio of blocked area to total cross sectional area of 1/4, 1/2 and 3/4. The Reynolds number based on pipe diameter ranged from 150 to 1200. With increasing Reynolds number, the flow structure around the reattachment region became unstable and highly wavy. The flow over the reattachment region became highly turbulent in the center of the shear layer. Also the reattachment region was slightly dependent on the Reynolds number and moved downstream as the blockage ratio increased. Flow visualization results showed flow patterns similar to those obtained using NMR imaging technique.

1. 서 론

많은 공학적 실제 문제들에서 경제조건의 불연속성에 기인하여 발생하는 박리 및 재부착 유동에 대한 연구는 오래전부터 많이 연구되어 왔다⁽¹⁾. 예를 들면 산업설비에서 많이 보게되는 덕트단면의 돌연 확장 및 수축, 아음속 디퓨저, 배플(baffle), 밸브 및 오리피스와 같은 부분 장애벽 하류 흐름등에서 이와같은 현상을 볼 수 있다. 그러나 이러한 유동 현상은 큰 난류강도, 재순환 영역, 급격한 압력변화 등이 복합된 복잡한 난류 유동이기때문에 대부

분의 연구는 흐름의 형태 및 기하학적 조건이 비교적 간단한 2차원 혹은 축대칭 유동에 관한 것이었다^(1,2). 특히, 상수도, 중화학 플랜트 배관, 열교환기와 같은 많은 실제적인 문제, 혈관 흐름과 같은 인체공학적 문제에 직결되는 박리된 관 흐름에 대한 연구는 측정방법 및 기술적 문제로 많은 제한을 받아왔다.

박리된 관흐름에 대한 연구로 Chaturvedi⁽³⁾와 Mihn and Chassaing⁽⁴⁾는 확장관에 따른 후향단(backward-facing step) 박리 관흐름을 연구하였으며, Mills⁽⁵⁾와 Nigro, Strong and Alpay⁽⁶⁾는 파이프 오리피스의 손실특성을 연구하기 위하여 매우 낮은 레이놀즈수의 점성유동을 수치적으로 해석하였다. Krall and Sparrow⁽⁷⁾와 Koram⁽⁸⁾은 축대칭

* 정회원, 포항공과대학 기계공학과

오리피스 및 부분 오리피스판을 설치하여 장애벽이 없는 경우보다 몇배나 큰 축방향 및 원주방향의 열 전달률을 구하였다. 부분 오리피스판을 지나는 난류 관유동의 유동구조를 이해하기 위하여 Lau⁽⁹⁾는 축방향 및 원주방향의 압력분포를 측정 하였으며 재부착 영역을 염료로 사용하여 가시화 하였다. Bradley 등⁽¹⁰⁾은 혈관 흐름을 측정하기 위한 기초 연구로써 내경 1cm의 Tygon 튜브와 반달 모양의 판이 설치된 내경 1.6cm 튜브내의 흐름을 만들어 NMR 유속영상의 측정 기법을 연구하였다.

유체의 속도측정 기술은 많은 발전을 거듭하여 왔으나, 기존의 측정 기법으로는 본 연구와 같이 흐름자체가 복잡한 속도장 측정에는 많은 어려움이 따른다⁽¹¹⁻¹³⁾. 예를들면 LDV시스템으로 역방향 속도성분이 있는 박리유동의 전체 속도장을 짧은 시간내에 측정하는데는 여러가지 문제점들이 따른다⁽¹⁴⁾. Tanny and Schlien⁽¹⁵⁾은 유동의 경로사진을 디지털처리하여 속도장을 측정 하였는데 여기에는 많은 데이터 처리시간과 가시화를 위한 제반설비가 요구된다. 최근에는 인체단층촬영에 사용되고있는 NMR-CT를 이용하여 짧은 시간내에 유동장을 측정할 수 있는 새로운 속도장 측정방법인 NMR 위상영상법^(16,17)이 개발되었다.

본 연구에서는 파이프내에 부분 오리피스판을 장착하여 이 장애벽 전후에서 발생하는 유동현상을 박리 전단층의 유동구조와 재부착 경계층을 중심으로 실험적으로 연구하였다. 측정방법으로 유동의 속도장변화를 구하기 위하여 NMR 위상 영상법을 사용하였고, 과망간산칼륨을 염료로 가시화 실험을 수행하여 그 결과를 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구는 원관내부에 부분 오리피스판을 장착하여 이 장애벽 전후에서 발생하는 박리 및 재부착 현상을 연구하는 것으로 개념도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 빗금친 부분은 장애벽을 나타내며, 두께 4mm의 아크릴판을 부분 오리피스 모양으로 가공하여 제작하였다. 장애벽의 막힘비(blockage ratio) R 는 파이프의 단면적과 장애벽에 의한 막힌 부분의 면적비로 나타낸다. 본 연구에서는 막힘비 R 이 1/4, 1/2, 3/4인 세가지 경우에 대하여 실험하였는데, 이에 해당하는 장애벽의 높이 H 는 각각 12, 20, 28mm 이다. 여기서 장애벽 두께 W 와 높이 H 의 비값이 0.5이하이므로, 두께와 끝부분의 형상이 후류에 미치는 영향을 무시할 수 있다⁽¹⁸⁾.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이며 수두차로 시험부에 유동장을 형성시키는 부분, 시험부 그리고 배출된 유량을 재순환시키는 부분으로 이루어져 있다. 시험부는 내경 40mm, 길이 1.5m, 두께 5mm인 원형 아크릴 파이프를 3개를 프랜지로 연결하여 제작하였다. NMR영상 시스템 내부에는 자장에 영향을 주는 금속성 재질을 사용할 수 없으므로 플랜지 연결용 볼트, 너트는 니일 롱 볼을 가공하여 사용하였다. 모든 연결부위는 매끈하게 유동의 불연속성이 없게 하였으며 물이 새지 않게 하였다. 장애벽은 중앙 아크릴판의 1/3지점에 설치하였는데, 파이프 입구에서 장애벽까지의 입구부 길이는 약 50D로 유동이 완전히 전개 되게끔

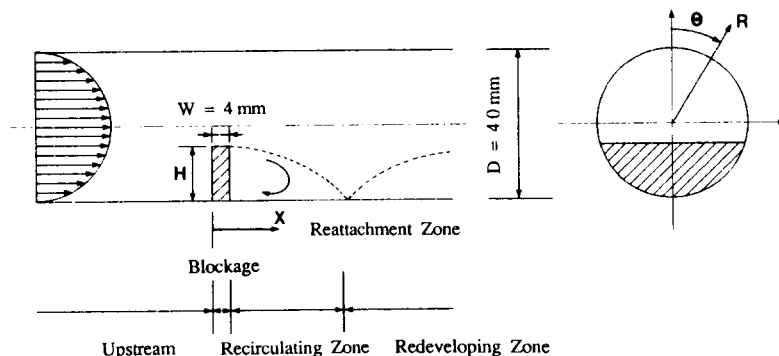


Fig. 1 Definition sketch of separated pipe flow

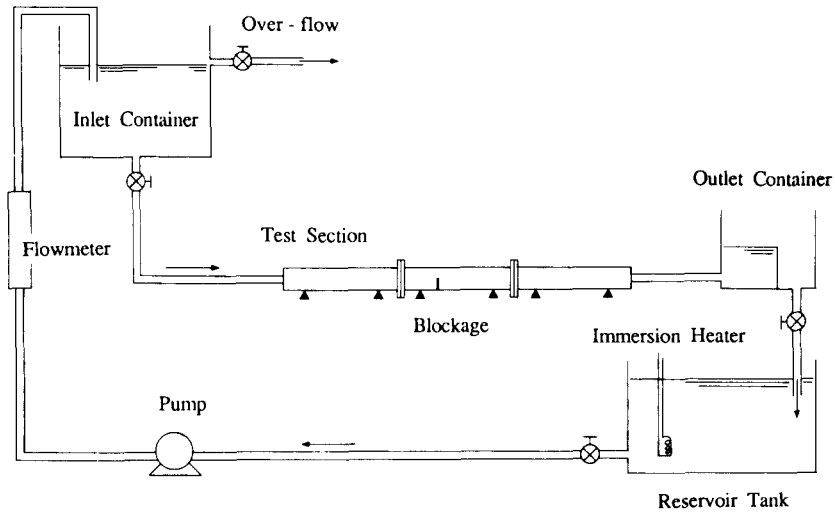


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

길게하였다. 유량계를 거쳐 입구수조로 들어온 물은 일정유량으로 조절된 뒤 출구수조와의 수두차에 의하여 시험부에 안정된 유동장을 형성시키며, 출구수조에서 배출된 물은 저장탱크를 거쳐 순환펌프에 의해 입구수조로 재공급된다. 이때 순환펌프의 부하변동에 기인한 유량변화에도 수두를 일정하여 유지하기 위하여 입구수조에 배수구(over flow)를 설치하였다. 또한 실내와 작동유체 사이의 온도차는 벽면을 통한 열전달로 유동장을 변화하게하므로 저장탱크에 3kW의 수중히터를 설치하여 열절달 효과를 최소화시켰다.

본 실험에서는 20KG(Gauss) KAIST 초전도 NMR-CT(Nuclear Magnetic Resonance-Computerized Tomography) 시스템을 속도장 측정기에 사용하였다. NMR 위상 영상법은 물자체가 포함 하고있는 수소핵이 유속과 같이 흐르면서 방사하는 신호를 FFT방식으로 phase encoding하여 유속영상을 알아내는 것으로 자세한 것은 참고문헌(16)과 (17)에 나와있다. Resistive NMR보다 분해능이 큰 초전도 NMR을 사용할 경우, 보다 정교한 영상을 얻을 수 있으나 주파수 특성상 측정 가능한 속도범위에 제한이 따른다. 이 문제를 해결하기 위하여 본실험에서 사용된 미분 위상영상법은 flow encoding을 두번하여 각각에서 구해진 위상영상을 빼줌으로써 유속영상을 구하는 방식으로 펄스 차례(pulse sequence)는 Fig. 3과 같다. 즉 그

림에서와같이 시간 간격 T_a 해당하는 위상영상에서 시간 간격 T_b 에 해당하는 위상영상을 빼줌으로써 미분 속도위상을 구할수 있다. Z-방향 선형 경사자계 G_z 와 선택적 RF(Radio Frequency)펄스를 사

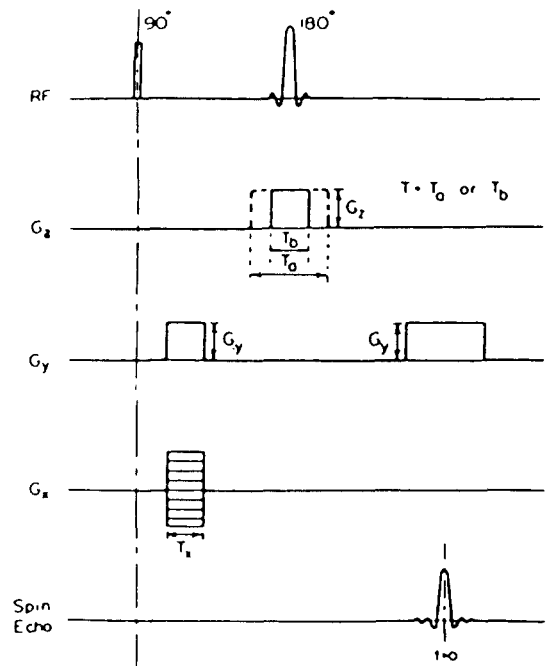


Fig. 3 Pulse sequence of differential phase encoded flow velocity imaging

용하여 구한 Z-방향 속도위상 ϕ_{V_z} 는 다음과 같다.

$$\phi_{V_z} = \frac{\gamma G_z V_z}{4} (T_a^2 - T_b^2) \quad (1)$$

여기서 γ 는 수소핵의 gyromagnetic 상수이며, V_z 는 Z방향 속도성분이다. 식 (1)로부터 속도가 위상변화에 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 시험시 G_z , T_a 혹은 T_b 값을 적절히 조정하여 속도위상 (velocity encoded phase)이 $\pm 180^\circ$ 범위 내에 있게끔 한다. 이와 같은 미분위상 영상 알고리즘을 사용함으로써 측정할 수 있는 속도범위가 확장되고, 영상수준도 향상될 수 있었다. 보다 빠른 NMR 유속영상을 얻기 위해서 작동유체에 약간의 $MnCl_2$ 를 첨가해서 수소이온 농도를 높였다. 원하는 단면의 유속영상은 AP500 Array processor와 함께 Vax 11/780 컴퓨터를 사용하여 데이터 처리함으로써 구하였다. 유속영상속에 담겨있는 유속정보는 속도성분의 빠르기, 즉 스칼라양이므로 원하는 속도장을 보기에 편하도록 명암의 밝기로 표시하였다. 이와같은 방법으로 어떤 원하는 단면에서의 3차원 유속영상도 짧은 시간내에 얻을 수 있다. 본 연구에서는 축방향 속도성분의 유체흐름 단면에 대한 유속영상(axial)과 횡단면 유속영상(sagittal) 유속영상을 256×256 픽셀(pixel) 크기로 구하였다.

가시화 기법에서는 박리 및 재부착 유동현상, 특히 재부착점 위치 확인에 주안점을 두었다. 이를 위하여 장애벽 하류의 시험부 바닥면($\theta = 180^\circ$)을 따라 길이방향 10mm간격으로 수액 주사바늘(외경 0.9mm)을 가공하여 염료 주입구를 설치하였다. 염료로는 농도 1 mg/l 과망간산칼륨 수용액을 사용하였고, 같은조건의 반복실험을 통해 재부착점의 위치를 확인하고 가시화된 유동구조를 할로겐 램프로 조명하여 Nikon FE 카메라로 촬영하였다.

3. 결과 및 토의

본 실험연구에서는 상류 유동조건과 막힘비 등과 같은 동적 매개변수 변화에 따른 속도분포, 박리 전단층의 상태, 박리점 및 재부착점의 위치 변화와 같은 유동특성들을 해석하였다. 즉 막힘면적비 R 이 1/4, 1/2, 3/4인 세가지 장애벽에 대하여 상류 유동조건이 $Re = 150 \sim 1,200$ 인 층류운동에 대해서 실험하였다. 여기서 레이놀즈수($Re = DU_0/\nu$)는 파이프 내경 D , 상류 평균속도 U_0 에 기초한다.

Fig. 4는 $R = 1/2$, $Re = 500$ 인 경우의 장애벽 상,

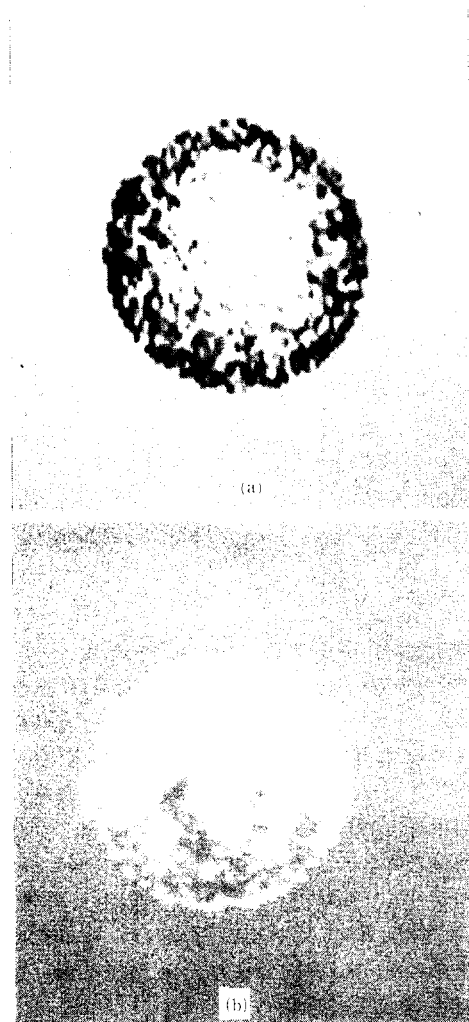


Fig. 4 Axial flow velocity image of axial velocity at $Re = 500$, $R = 1/2$ (a) $X/D = -8$ (b) $X/D = 2$

하류에서의 흐름방향에 수직인 단면에서 구한 축방향 속도성분의 유속영상이다. 여기서 명암으로 속도의 빠르기를 표시하였는데, 밝을수록 빠른속도를 나타내며 검은 부분은 역방향 속도를 나타낸다. Fig. 4(a)로부터 장애벽 $X = -8D$ 위치에서의 유동이 포물선형의 속도분포로 거의 축대칭임을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 장애벽 하류 $X = 2D$ 위치 단면의 유속영상으로 윗부분에 있는 검은 위치를 나타내기 위한 표시이다. Fig. 4(b)에서보면 아래의 꽃받침 모양의 검은 부분은 재부착점으로부터 되돌아오는 재순환 유동을 나타내는 것으로 장애벽 하류에 3차원 유동이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 막힘비 1/2인 경우, Re 수 변화에 따른 속도장 변화를 나타낸 것으로 유체흐름 방향의 중앙 횡단면에서의 축방향 속도성분(U)의 유속영상이다. 파이프 직경을 따라 유속정보를 갖고 있는 픽셀 수가 50개이므로, 이 하나의 유속영상속에 12,800(50×256)개 위치의 속도정보를 담고 있다. 여기서 명암등급(gray level)을 8로하여 등속도 분포를 쉽게 알 수 있게 하였는데, 수직 장애벽 바로 뒤에 박리영역을 형성하여 하류벽에 재부착한다음 재발달(redevelop)하여 나아감을 알수 있다. 여기서보면 Re 수가 증가함에 따라 재부착점 부근에서의 유동구조가 불안정해지며, (C)부터는 물결무늬 모양을 나타내 보인다. Fig. 5의 유속영상 결과로부터 재부착점 위치를 구하면 $Re=500-700$ 의 경우 $X/D=2.2 \sim 2.5$ 부근에서 재부착점이 형성되고 있다. $Re=800$ 이상에서는 박리전단영역이 크게 교란되어서 유속영상에 phase over가 발생하였다. 여기서 phase over란 실험시 설정한 NMR조건에서 구한 속도위상이 $\pm 180^\circ$ 범위를 벗어난 것을 말하며, 이것으로부터 난류 크기를 대략적으로 알 수 있다.

원하는 임의단면에서의 속도분포는 앞에서 구한 유속영상의 속도정보로부터 쉽게 얻어낼 수 있다. Fig. 6은 $R=1/2$, $Re=650$ 경우, 하류로 나아감에

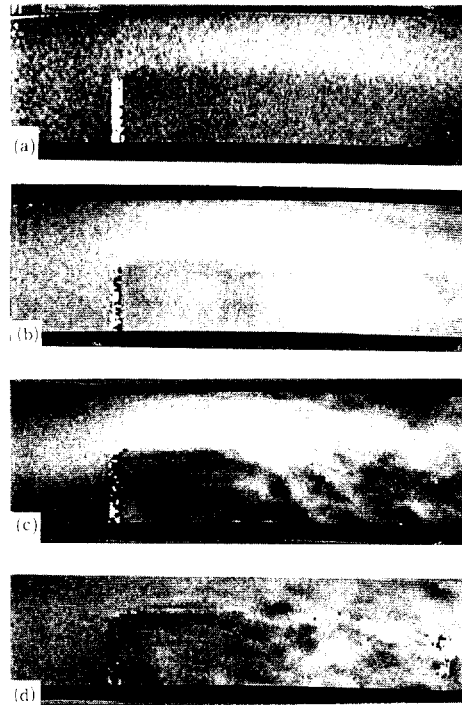


Fig. 5 Sagittal flow velocity image at blockage $R=1/2$ (a) $Re=245$ (b) $Re=500$ (c) $Re=650$ (d) $Re=700$

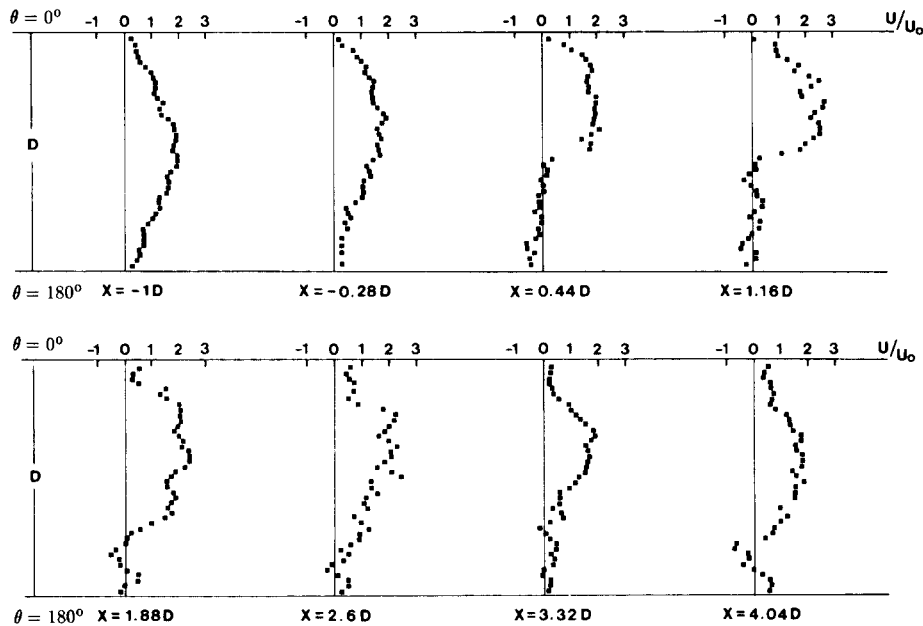


Fig. 6 Variation of velocity profile with downstream distance for $Re=650$ and $R=1/2$

다른 속도분포 변화를 $0.72D$ 간격으로 표시하고 있는데, 속도를 상류 평균속도 U_0 로 무차원화 시켰다. 여기서 장애벽 상류인 $X = -0.7D$ 위치에서의 속도분포는 거의 포물선 형태를 유지하고 있으며 장애벽에서 $X = 1.8D$ 까지의 재순환영역을 속도분포로부터 확인할 수 있다.

막힘 정도에 따른 유동구조를 연구하기 위하여 비슷한 Re 수에서 3가지 막힘비에 대한 유속영상을 Fig. 7에 표시하였다. 막힘비가 커질수록 막힘에 기인한 급격한 압력손실을 회복하는데 필요한 시간이 길어지므로 재부착 영역은 하류로 이동하였다. $R = 1/4$ 인 경우 유동이 안정되어있으며, $R = 1/2$ 인 경우 재부착점부근에 장애벽 높이 크기의 large-eddy 유동이 형성된다. $R = 3/4$ 인 경우에는 재부착점에 이르기전 박리 전단층에서 강한 혼합이 시작됨을 볼 수 있다. 또한 재부착점 부근의 유속영상으로부터 난류강도는 박리 전단층 중앙부근에서 가장 큰 값을 가짐을 볼 수 있는데 이는 후향단 흐름에서와 같다.

Fig. 8은 재부착점을 조사하기 위한 가시화실험을 보여주는 것으로 주입한 염료 filament의 움직임을 관찰함으로써 유동특성 및 재부착점 위치를 구하였다. 재부착점 이전 구간에서는 박리영역내부의 재순환 흐름을 보여주다가 하류로 나아감에 따라 상류 쪽으로만 향하던 염료 filament가 가끔은 하류쪽으로 향하게 된다. 여기서 좀더 나아가게 되면 상, 하류 어느쪽으로도 나아가지않는 영역이 있게 되는데, 이 부분이 바로 재부착점으로 정의된다. 재부착점은 그 자체의 비정상적인 특성 때문에 반복적인 실험

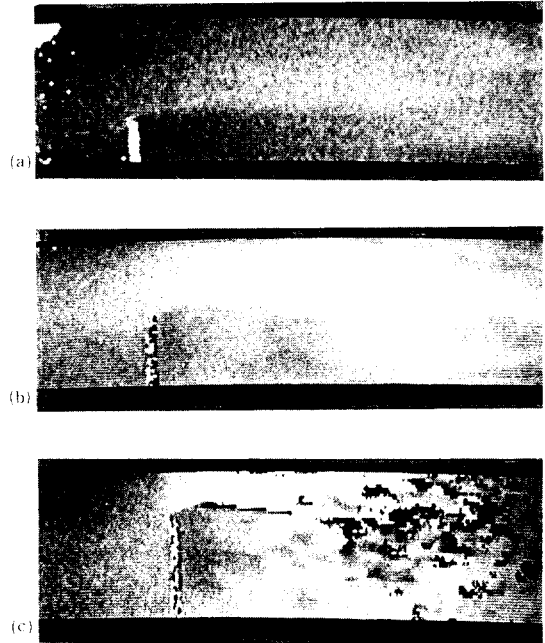


Fig. 7 Sagittal flow velocity image at $Re = 500$ (a) $R = 1/4$ (b) $R = 1/2$ (c) $R = 3/4$

를 통해 통계적으로 구하였으며, 그 결과를 NMR결과와 함께 Fig. 9에 나타내었다. 그림에는 반복적인 실험에서 구한 재부착점의 불확실성 구간 (uncertainty range)을 평가하여 함께 표시하였다. $R = 1/4$ 인 경우 재부착점의 위치는 $X_R = 1.3 \sim 2.2D$ 구간내에 있으며, Re 수가 증가에 따라 처음에는 약간 증가하다가 최대점에 이르면 감소하는 경향을 보이고있다. $R = 1/2$ 인 경우 $Re > 400$ 구간에서

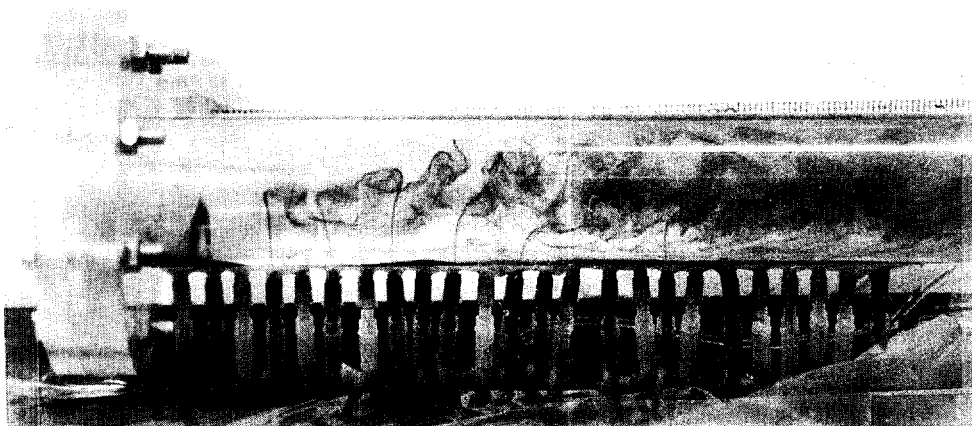


Fig. 8 Photograph of downstream dye-injection experiment

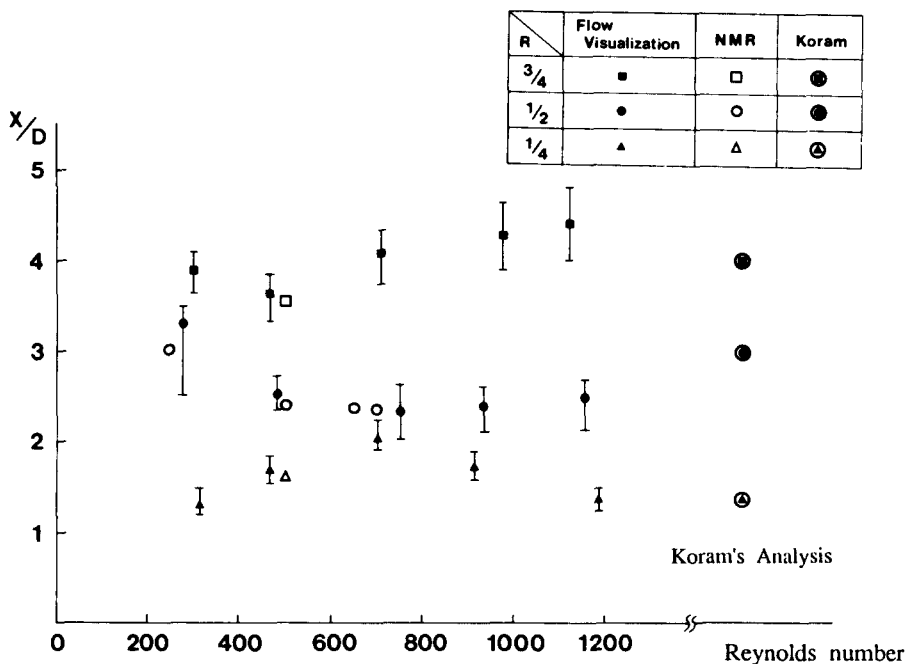


Fig. 9 Measurement of reattachment point by flow visualization

재부착점은 Re 수에 관계없이 거의 일정한 값 $X_R=2.3\sim 2.6D$ 를 가진다. $R=3/4$ 인 경우에는 Re 수 증가에 따라 재부착점은 하류로 이동하며 본 연구에서 수행한 Re 수 범위에서 $X_R=3.6\sim 4.4D$ 의 값을 갖는다. 가시화실험에서 구한 재부착점 위치는 NMR유속영상으로부터 구한 재부착점 결과와 거의 일치한다. 그림의 오른쪽 끝부분 기호는 같은 기하학적 조건의 난류유동($Re=11,000\sim 60,000$)에서 최대열전달 값을 갖는 지점을 구한 Koram⁽⁶⁾의 결과이다. 이것으로부터 열전달이 최대인 위치는 재부착점과 거의 일치하고있음을 알 수 있다. 본 연구를 통해서 재부착점의 위치는 Re 수 변화에는 약간 의존하나, 막힘비에 크게 지배받는다.

4. 결 론

관 내부에 부착된 부분 오리피스관에 의해서 발생하는 박리 및 재부착 유동현상을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측정 방법 및 기술적 문제로 제한을 받아오던 3차원 원관흐름의 유동장을 NMR위상영상법의 응용으로 측정함으로써 유동해석 및 예측에 필요한 입력변수를 구하였다.

(2) Re 수가 증가함에 따라 재부착점 부근에서의 유동구조가 불안정해지며, 박리전단층 중앙에서 큰 난류강도로 물결무늬 영상을 나타내보인다.

(3) 재부착점의 위치는 Re 수에는 약간의 의존성을 보이거나 막힘비 R 이 증가함에 따라 하류로 크게 이동한다.

(4) 가시화실험에서 구한 재부착점은 NMR결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 재부착점의 위치는 $R=1/4$ 인 경우 $X_R=1.3\sim 2.2D$, $R=1/2$ 인 경우 $X_R=2.3\sim 2.6D$ 이며 $R=3/4$ 인 경우에는 $X_R=3.6\sim 4.4D$ 이다.

후 기

본 연구를 수행하는데 도움을 준 KAIST 영상연구실 조장희교수님과 정희택군에게 감사드리며, 연구비를 지원해주신 한국과학재단과 산업과학기술연구소(RIST) 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참 고 문 헌

(1) Simpson, R. L., 1981, "Review of Some Phenom-

- ena in Turbulent Flow Separation", J. of Fluids Eng., ASME, Vol. 103, pp. 520~533.
- (2) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment", AIAA J. Vol. 19(9), pp. 1093~1100.
- (3) Chaturvedi, M.C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansions", J. Hydraulics Div., pp. 61~62.
- (4) Mihn H. Ha and Chassaing, P., 1979, "Perturbations of Turbulent Pipe Flow", Turburent Shear Flows I; pp. 178~197.
- (5) Mills, R.D., 1968, "Numerical Solutions of Viscous Flow Through a Pipe Orifice at Low Reynolds Numbers", J. of Mech. Eng. Science, Vol. 10(2), pp. 133~140.
- (6) Nigro, F.E.B, Strong, A. B. and Alpay, S.A., 1978, "A Numerical Study of the Laminar Viscous Incompressible Flow Through a Pipe Orifice", J. of Fluids Eng. ASME, Vol. 100(4), pp. 467~472.
- (7) Krall K.M. and Sparrow, E.M., 1966, "Turbulent Heat Transfer in the Separated, Reattached, and Redevelopment Regions of a Circular Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 88, pp. 131~136.
- (8) Koram, K.K., 1977, "Heat Transfer Downstream of an Asymmetric Flow Separation in a Circular Tube", M.S. Thesis, Univ. of Minnesota.
- (9) Lau, S.C., 1978, "Flow Field Phenomena Downstream of a Segmental Blockge in a Turbulent Pipe Flow", M.S. Thesis, Univ. of Minnesota.
- (10) Bradley, Jr W.G., et al., 1984, "The Appearance of Rapidly Flowing Blood on Magnetic Resonance Images", AJR, Vol. 143, pp. 1167~1174.
- (11) Eaton, J.K., Jeans, A.H., Ashjaee, J. and Johnston, J.P., 1979, "A Wall flow-Direction Probe for Use in Separating and Reattaching Flows", J. Fluids Eng. Vol. 101, pp. 364~366.
- (12) Boyle, D.R. and Golay, M.W., 1983, "Measurement of A Recirculating 2-Dimensional, Trubulent Flow and Comparision to Turbulence Model Predictions, II: Transient Case", J. of Fluids Eng. Vol. 105; pp. 447~454.
- (13) Schraub F.A. et al., 1965, "Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows", J. of Basic Eng., pp. 429~444.
- (14) Chehroudi B. and Simpson, R.L., 1984, "A Rapidly Scanning Laser Doppler Anemometer", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 17, pp. 131~136.
- (15) Tanny, J. and Schlien, D.J., 1985, "Velocity Field Measurements of a Laminar Starting Plume", Phys. Fluids 28(4), pp. 1027~1032.
- (16) Cho, Z. H. et al., 1986, "A New NMR Technique for Unambiguous Unidirectional Measurement of Flow Velocity", J. of Applied Physics, Vol. 60(4), 273~281.
- (17) Lee, S.J. and Chung, M.K. 1986, "Experimental Study of Thermally Stratified Unsteady Flow by NMR-CT", Proceeding of the 8th Int. Heat Transfer Conference, ASME, Sanfrancisco, CA. USA, Vol. 2, pp. 537~542.
- (18) Durst F. and Rastogi, A.K., 1979, "Theoretical and Experimental Investigation of Turbulent Flow with Separation", Turburent Shear Flows I, pp. 208~219.