

장애물을 갖는 덕트내의 유동가시화 및 수치해석에 관한 해석

Flow Visualization and Numerical Calculation in a Channel Perturbed by Curvilinear Blockages

문 찬*, 박진철**, 김철***
C. Moon, J. C. Park, C. Kim

Key words : Laminar Flow(층류유동), Heat Transfer(열전달), Blockage(장애물), Finite Analytic Method(유한해석법), Separated Flow(박리유동), Flow Visualization(유동가시화)

Abstract

Laminar flow and heat transfer in a channel with blockages are obtained numerically in a Reynolds-number range of $100 \leq Re \leq 400$.

A boundary-fitted curvilinear coordinate system is generated for irregular boundary of the physical region, and solutions of Navier-Stokes equation and energy equation are obtained by finite analytic method in the transformed computational domain

The flow separates in downstream of the blockage and the length of separated-flow region increases with Reynolds number. The heat flux is high on the top of the blockages and increase in the heat transfer occurs where the fluid reattaches the wall.

Comparison between computed streamlines and experimental flow-visualization is also presented and discussed.

기 호 설 명	
<p>A, B : Coefficients in the linearized transport equation.</p> <p>A_s, B_s, E_s : Coefficients of the transport equation for variable ϕ.</p> <p>b_i^j : Geometric coefficients.</p> <p>C_{sub} : Finite analytic coefficients.[sub=NE, NW, SW, etc.]</p> <p>f : Grid control functions.</p>	<p>g^{ij} : Conjugate metric tensor.</p> <p>G : Source term of finite analytic equation.</p> <p>h : Dimensionless grid spacing in the j-direction.</p> <p>H : Section height.[cm]</p> <p>J : jacobian.</p> <p>k : Dimensionless grid spacing in the i-direction.</p> <p>N_u : Nusselt number[$N_u = hH/k$]</p> <p>Pe : Peclet number.[$Pe = RePr$]</p> <p>Pr : Prandtl number.[$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$]</p> <p>q : Heat flux.[W/m²]</p> <p>r : Blockage Height.[cm]</p>
<p>* 순천대학교 공과대학 기계공학과</p> <p>** 국방품질관리소</p> <p>*** 전남대학교 대학원 기계공학과</p>	

- R : Section height from center line to the wall.[cm]
- Re : Reynolds number [$Re = \frac{U_m H}{\nu}$]
- Re_{ϕ} : Effective Reynolds number for variable ϕ .
- S, S' : Source function for the variable ϕ .
- t : Time.
- T : Temperature.
- u : Dimensionless velocity component parallel to the x-axis.
- U_m : Inlet average velocity.
- v : Dimensionless velocity component parallel to the y-axis.
- x, y : Cartesian coordinates.
- W : Blockage width.
- ξ, η : Transformed coordinates.
- ϕ : Transport quantities.
- θ : Dimensionless temperature.

1. 서 론

장애물(blockage) 설치 또는 발생에 의한 단면 변화를 갖는 덕트 또는 파이프내의 유동과 열전달은 열교환기, 응축기, 보일러, 유조 파이프의 용접, 핵 반응기의 연료봉 등의 설계에 있어서 매우 중요하게 다루어 진다. 특히 핵연료봉에 있어서 장애물 발생에 의한 연료봉의 온도 변화와 연료봉 냉각 작용의 악화, 압력 강하로 인한 냉각수 유량 변화 등은 미리 예측되어야 할 것이다. 따라서 장애물을 갖는 유동 및 열전달에 관해서는 기하학적인 요소와 레이놀즈 수 등가 같은 유동 변수 변화에 따라 연구되고 있다. 기하학적인 요소로서는 장애물의 높이, 길이와 형상등이고, 유동에 관련된 변수로는 레이놀즈 수와 프란틀 수 등이다.

장애물을 갖는 덕트내의 유동은 전향(forward) 계단 및 후향(backward) 계단을 갖는 유동의 일종으로서, 관로 또는 파이프 등의 문제를 주로 다루었다. 이러한 유동의 경우, 장애물의 형상 및 레이놀즈 수 변화에 따라 압력 강하와 재순환 유동에 대한 연구가 수행되어 왔다. Ghia 등¹⁾은 압력 분포에 대한 타원형 방정식과 포물화한 운동량 방정식의 반타원형(semi-elliptic) 수학적 모형을 사용하여 축

대칭의 장애물을 갖는 채널내의 유동에 관한 유선, 전단응력 및 압력분포 등을 구하였다. 그 결과 레이놀즈 수 100에서는 단지 장애물 바로 후면 아래에서 박리유동이 형성되었지만, 레이놀즈 수 1000에서는 위, 아랫면에서 재순환 유동이 형성됨을 보였다. Rastogi²⁾는 비선형 경계 일치 직교 좌표계(curvilinear boundary fitted orthogonal coordinates)를 이용하여 다양한 형태의 축대칭 장애물을 갖는 튜브내의 유동을 연구하였으며, 매끄러운(smooth) 장애물 뒤의 박리영역은 뾰족한 형태(sharp-edged)의 장애물의 박리영역보다 매우 좁게 나타난다고 하였다. Agrawal 등³⁾은 튜브내에서 매끄러운 장애물을 갖는 고리모양(annuli)의 등온벽을 갖는 덕트내에서의 유동 및 열전달에 대해 와도 수송 방정식, 유동 함수-와도 방정식 및 에너지 방정식을 ADI(alternate direction implicit)법에 의하여 수치 해석하였다. 그 결과 압력 손실은 장애물의 최대 높이가 부근에서 발생하고 재부착 위치에서 급격한 열전달율의 증가를 가져왔다.

본 연구에서는 Fig.1과 임의의 장애물 형상을 갖는 덕트내의 2차원 층류유동 및 열전달에 관하여 수치 해석 및 실험을 통하여 고찰하고자 하였다. 주 해석 영역 압력 구배가 심한 장애물 부분을 선택하였으며, 덕트의 윗면과 아랫면이 등온이고 유동은 물에 관한 강제 대류, 층류 및 정상 상태로 가정하여 속도, 압력 및 온도 등을 해석함으로써 장애물이 유동 특성 및 열전달에 미치는 영향을 레이놀즈 수와 장애물의 기하학적 형상 및 크기 정도에 따라 규명하고자 한다.

연구범위는 Table 1과 같으며, 수치 해석 방법은 유동 방향과는 무관하게 모든 방향에 대해 정확한 해를 구할 수 있는 Chen⁴⁾의 유한 해석법(finite analytic method)을 사용하였으며, 기본적인 수치 알고

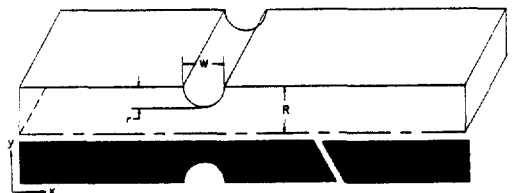


Fig.1 Schematic of a channel with semicircular blockage.

Table 1 Detailed conditions of the present study.

	Reynolds No.			r	W	R	H
	100	200	400	0.5	1.	1.0	2.0
Case 1	100	200	400	0.5	1.	1.0	2.0
Case 2	100	200	400	0.5	1.72	1.0	2.0
Case 3	100	200	400	0.5	3.40	1.0	2.0

리즘은 Patankar⁵⁾의 SIMPLER(semi-implicit method for pressure linked equation revised)를 사용하였다. 실험은 물에 부유입자(pliolute, 비중 1.026)를 띄워 레이저 광에 의한 산란 효과로 반사된 빛을 카메라로 포착하여 유동 가시화를 실시하여 수치 해석 결과와 비교 검토하였다.

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

Fig.1과 같이 장애물을 갖는 덕트내의 유동에 대하여 유체가 비압축성 뉴우튼 유체이고, 유동은 2차원 정상 상태 층류 강제 대류인 경우, 무차원화된 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2-1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2-2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{2-3}$$

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \tag{2-4}$$

여기서, u, v 는 각각의 속도를 입구의 평균속도 U_m 으로, x, y 는 덕트 입구의 높이 H 로, p 는 압력을 ρU_m^2 으로, θ 는 온도를 $\Delta T (= T_w - T_i)$ 로 무차원화한 량이다. 또한 Re 는 레이놀즈 수이고, Pe 는 Peclet수이다.

경계 조건은 아래와 같다.

$$u = v = 0, \theta = 1 \quad ; \text{벽면}$$

$$u = 6(y - y^2), v = 0 \quad ; \text{입구}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad ; \text{출구}$$

2.2 격자 생성

장애물을 갖는 덕트내의 유동에서의 격자 생성은 유동 및 단면 변화가 심한 영역에서는 조밀한 격자 간격을 유지하기 위하여, 경계면에서는 대수식에 의하여 격자점을 생성하고⁶⁾, 여기서 생성된 경계 격자점을 이용하여 Thompson⁷⁾이 제안한 Poisson 방정식으로 물리적 영역에서의 좌표계(x, y)를 계산영역에서의 좌표계(ξ, η)로 변환하였다.

Fig.1에 나타낸 격자구조는 물리적 영역에 경계 일치 좌표계를 생성시켜 나타낸 것이다. 장애물 부분의 급격한 유동 변화와 열전달 현상을 관찰하기 위해서 아래 벽면 부분과 장애물 부분의 격자를 조밀하게 형성하였다.

본 논문에서는 Harlow와 Welch⁸⁾에 의해서 도입되었던 엇갈린 격자계를 채택하였다.

2.3 이산화방정식(Discretization Equation)

수치 계산을 하기 위해서는 물리적 좌표의 지배 방정식을 변환된 좌표(ξ, η)의 지배방정식으로 나타낼 필요가 있다.

직교 좌표계(x, y)에서 수치 계산 좌표계(ξ, η)로 변환하여 지배 방정식을 나타내면 다음과 같다.

연속장정식

$$[(b_1 u + b_2 v)]_x + [(b_1^* u + b_2^* v)]_y = 0 \tag{2-5}$$

운동량 방정식

$$Re_s \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{Re_s}{J} \left[(b_1 u + b_2 v) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (b_1^* u + b_2^* v) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] \\ = g^{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + g^{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + 2g^{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi \partial \eta} + f^x \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + f^y \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + S^* \\ Re_s$$

에너지 방정식

$$\begin{aligned}
 & Pe \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \frac{Pe}{J} \left[(b_1^i u + b_2^i v) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + (b_1^i u + b_2^i v) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] \\
 & = g^{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + g^{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + 2g^{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi \partial \eta} + f^1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + f^2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta}
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

여기서 ϕ 는 u, v 및 θ 를 나타내며, g^{ij} 는 변환된 좌표계에서의 복소수 메트릭텐서(conjugate metric tensor), f^i 는 격자제어 함수를 나타낸다.

위의 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 한 격자에서 선형화된 일반형으로 나타내면 다음과 같다.

$$g^{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + g^{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} = 2A_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + 2B_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + E_\phi \frac{\partial \phi}{\partial t} + S_\phi
 \tag{2-8}$$

여기서

$$2A_\phi = \frac{Re_\phi}{J} (b_1^i u + b_2^i v) - f^1
 \tag{2-9a}$$

$$2B_\phi = \frac{Re_\phi}{J} (b_1^i u + b_2^i v) - f^2
 \tag{2-9b}$$

$$E_\phi = Re_\phi
 \tag{2-9c}$$

$$S_\phi = -Re_\phi S^* - 2g^{12} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi \partial \eta}
 \tag{2-9d}$$

$$J = \left(\frac{\partial \chi}{\partial \xi} \frac{\partial \nu}{\partial \eta} - \frac{\partial \chi}{\partial \eta} \frac{\partial \nu}{\partial \xi} \right) = |b^i|
 \tag{2-9e}$$

$$b_i^j = \begin{pmatrix} b_1^j & b_2^j \\ b_1^i & b_2^i \end{pmatrix}
 \tag{2-9f}$$

여기서 J 는 Jacobian, b_i^j 는 J 의 요소를 나타낸다. 위 식은 선형화된 방정식으로써, 격자 요소에서 경계조건을 지수 함수와 1차 함수의 합으로 나타내고, Fig.2의 격자 요소 영역에서 식 (2-8)의 해석해를 변수 분리법으로 구하여 한점에서의 해를 구하면, 9점을 포함하는 유한 해석 대수 방정식을 얻는다.

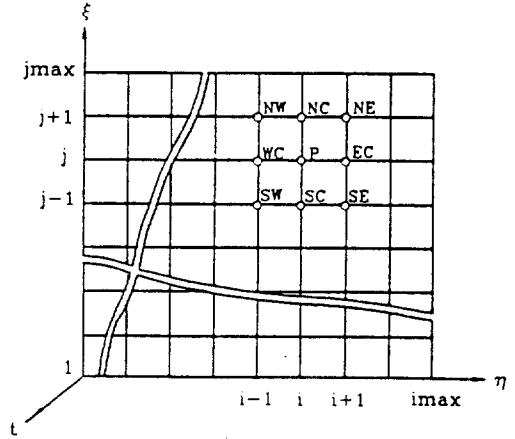


Fig.2 Domain and local element for finite analytic formulations.

$$\begin{aligned}
 \phi_p = & C_{NE} \phi_{NE} + C_{NW} \phi_{NW} + C_{SE} \phi_{SE} + C_{SW} \phi_{SW} + C_{EC} \phi_{EC} \\
 & + C_{WC} \phi_{WC} + C_{NC} \phi_{NC} + C_{SC} \phi_{SC} - C_p G
 \end{aligned}
 \tag{2-10}$$

여기서

$$C_{SC} = \left(\frac{\exp(Bk)}{2 \cosh(Bk)} \right) P_A
 \tag{2-11a}$$

$$C_{NC} = \exp(-2Bk) C_{SC}
 \tag{2-11b}$$

$$C_{WC} = \left(\frac{\exp(Ah)}{2 \cosh(Ah)} \right) P_B
 \tag{2-11c}$$

$$C_{EC} = \exp(-2Ah) C_{WC}
 \tag{2-11d}$$

$$C_{SW} = \left(\frac{\exp(Ah+Bk)}{4 \cosh(Ah) \cosh(Bk)} \right) (1-P_A-P_B)
 \tag{2-11e}$$

$$C_{SE} = \exp(-2Ah) C_{SW}
 \tag{2-11f}$$

$$C_{NW} = \exp(-2Bk) C_{SW}
 \tag{2-11g}$$

$$C_{NE} = \exp(-2Ah-2Bk) C_{SW}
 \tag{2-11h}$$

$$C_p = \frac{h \tanh(Ah)}{2A} (1-P_A) = \frac{k \tanh(Bk)}{2B} (1-P_B)
 \tag{2-11i}$$

$$P_A = 4E_2 Ah \cosh(Ah) \coth(Bk) \coth(Ah) \quad (2-11j)$$

$$P_B = 1 + \frac{Bh \coth(Bk)}{Ak \coth(Ah)} (P_A - 1) \quad (2-11k)$$

이다.

2.4 압력과 압력 수정 방정식

비압축성 유체 유동의 운도량 방정식의 해를 구하는데 있어서 속도장을 원시 함수 형태로 나타냄으로써 미지의 압력장 계산에 어려움이 생긴다. 압력은 운도량 방정식에 압력 방정식을 가지고 있지 않기 때문에 직접적으로 해를 구할 수 없다. 그러므로 압력 계산은 연속 방정식을 만족하도록 직접해서 전환되어 속도장의 계산에 따라 압력 수정 방정식을 이용하여 운도량 방정식을 풀 수 있도록 한다. 압력 수정 방법의 세부 사항은 Raithby등⁹⁾에 의해서 연구되었다. 본 연구에서는 이를 위하여 Pantakar⁵⁾의 SIMPLER 알고리즘을 사용하였다. 이때 사용된 압력 이완 계수는 0.2이고, 정상상태에 도달하는 CPU시간(IBM RS/6000 355M workstation)은 약 1800sec이고, 질량 생성항이 10⁻⁸에 도달하며, 수렴된 것으로 하였다.

3. 실험 장치 및 방법

유동의 특성을 고찰하고 수치 해석 결과와 비교 고찰하기 위하여 유동의 가시화 실험을 수행하였다. 실험은 레이놀즈 수 100과 200에 대하여 수행하였다.

3.1 실험 장치

시험 체적은 Fig.1에 나타낸 바와 같이 단면을

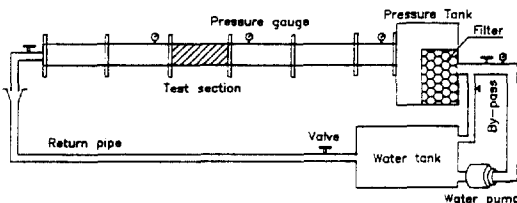


Fig.3 Schematic diagram of the experimental equipments.

갖는 길이 700mm의 시카 덕트로 입구에서 부터 200mm 위치에 장애물을 설치하였다. 앞면과 뒷면은 유동 상태를 관찰하기 위하여 각각 두께 2mm의 아크릴 판으로 하고, 윗면과 아래면은 두께 5mm 아크릴 판으로하였다.

부속 장치는 Fig.3과 같이 4부분-수조 및 압력 탱크, 유동 도입부와 출구부, 지지대, 광학 부속장치-으로 구성되어 있다. 여기서 광학 부속 장치는 시험체적과 수직 아래에 설치되어 있으며, 레이저 광원(He-Ne laser, 25mW)을 얇은 슬릿광(slit light)으로 만들기 위하여 볼록(convex) 렌즈 2개와 초점 거리 200mm인 실린드릭(cylindrical) 렌즈를 1개 사용하여 시험 체적과 일직선이 되도록 배열하였다. 렌즈에 의해 형성된 슬릿광은 입도가 조밀한 반사경을 통하여 시험체적의 아래에서 수직으로 입사되도록 하였다.

3.2 실험 방법

부유입자(pliolite, goodyear chemical co. 비중 1.026), 크기 44μm를 첨가한 유체를 수조에 가득 채우고, 펌프를 사용하여 압력 탱크에 유체를 이송시킨다. 이때에 압력 탱크에 이송되는 유체의 속도는 압력 조절 노즐과 바이패스(by-pass) 밸브를 이용하여 가능한 층류 유동에 가깝도록 하였다. 압력 탱크에 유입된 유량은 필터를 통과한 후 유동 도입부를 지나 충분히 발달된 층류 유동으로 바뀌어 시험 체적을 지나도록 하였다.

가시화 사진 촬영은 유동이 정상 상태로 된 후에, 카메라(pentax ME super)에 초점거리 15mm 확장 링을 부착하여 장애물의 전 후 유동을 촬영 대상으로 하였다. 노출 시간은 조리개 2.8에 1-2초로 하였다.

4. 결과 및 고찰

장애물을 갖는 덕트내의 강제 대류 운동에 관하여 유한 해석법에 의한 수치 해석 및 가시화 실험 결과를 고찰하고자 한다.

4.1 수치해석 결과

Fig.1과 같은 본 연구의 모델에 대한 수치 해석 결과는 장애물의 종류 및 레이즈 수에 따라 유선,

속도 벡터, 압력 및 온도 분포를 나타냈으며, 이 결과를 가시화 실험으로 검증하였다. 격자 구조는 Fig.1과 같이 80X24의 불균일 격자계를 사용하여 좌표 변환된 지배 방정식의 해를 구하였다. 또한 대류 열전달을 고찰하기 위하여 벽면을 따라 국소 누셀(Nusselt)수를 구하였다. 가열면에 대한 누셀 수는 $Nu = \frac{q_{y=0}H}{k(T_w - T_i)}$ 이며¹⁰⁾, 여기서 $q_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial y}$, T_i 는 초기의 유체 온도, T_w 는 가열벽면의 온도, H 는 덕트 입구의 높이를 나타낸다.

Fig.4는 반원 및 타원 장애물을 갖는 덕트내의 유동에 대하여 레이놀즈 수 200인 경우의 유동 합수를 나타내고 있다. 장애물 후류 윗부분에서 박리(separation)가 나타나며, 높이는 같고 장애물 폭이 클수록 박리에서부터 재부착점의 거리는 짧아지고 있으며, 박리점의 와류의 크기도 작아짐을 볼 수 있다. 이러한 현상은 레이놀즈 수 100, 400에서도 같은 현상을 볼 수가 있다. 동일한 형상의 장애물을 갖는 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 박리점은 장애물 상부에 가깝게 나타나며 재부착점의 거리도 박리점에서 멀어짐을 볼 수 있다. Table 2에 박리된 유동의 재부착 위치가 나타나 있다.

Fig.5는 Case 2의 레이놀즈 수에 따른 아래 벽면에서의 압력 분포를 덕트 입구의 압력을 기준으로 나타내고 있다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 박리점에서의 압력강하는 커지고, 재부착점을 지나 압력이 회복되는 위치도 늦어짐을 볼 수가 있다. 와류 유동 내부의 압력 분포에 의하면 와류 유동에 대한 구동력은 박리점 부근을 제외하고는 압력이 주요한 구동력으로 역할을 하지 않는다고 볼 수 있다. Fig.6은 레이놀즈 수 400에 대하여 각각의 장애물 형상에 대한 벽면에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 같은 레이놀즈 수에 대하여 형상의 기울기가 완만할 수록 박리점에서 압력강하의 절대값이 상대적으로 작아짐을 볼 수 있다.

Fig.7은 레이놀즈 수 200에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 입구에서부터 열경계층이 생성되며 장애물 상부에서는 열경계층이 상대적으로 얇게 나타남을 볼 수 있다. 층류 강제 대류 열전달은 유선에 수직인 방향의 열전달이 전도에 의한 열전달임을 고려할 때 입구 부근이나 장애물 상부에서는 열전달량이 많게 되며 장애물 후류면 하단과

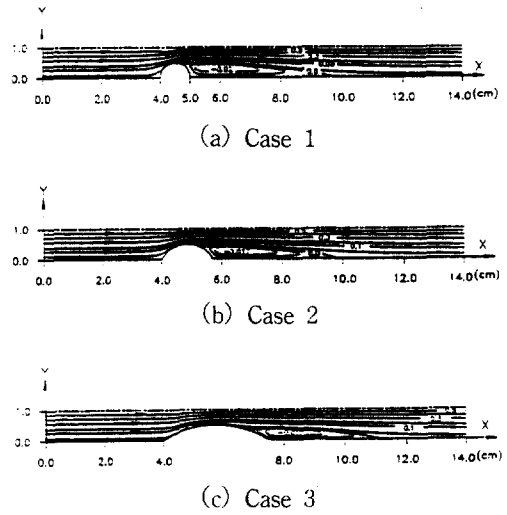


Fig.4 Streamline contours for a channel with Re=200.

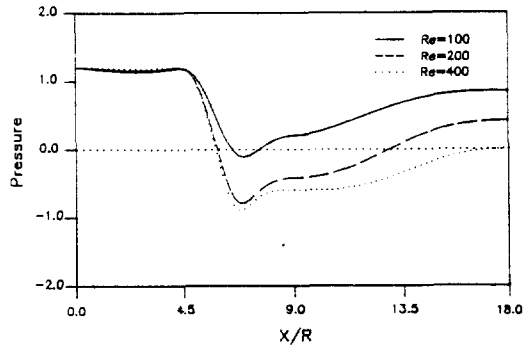


Fig.5 Pressure distribution for a channel with Case 2. (Dimensionless pressure)

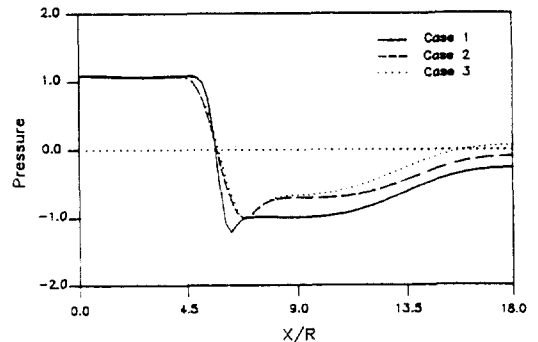


Fig.6 Pressure distribution for a channel with Re=400. (Dimensionless pressure)

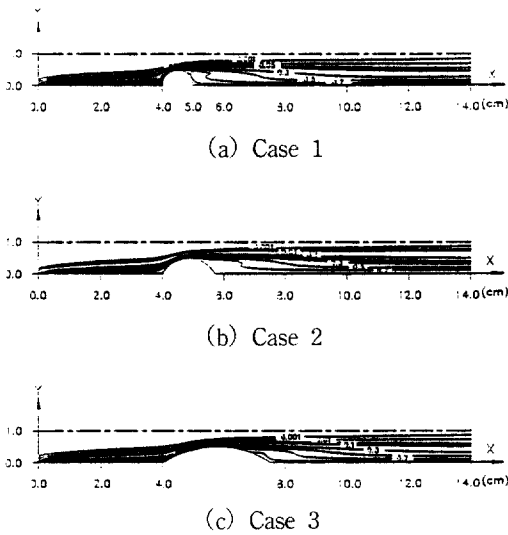


Fig.7 Temperature distribution for a channel with $Re=200$.

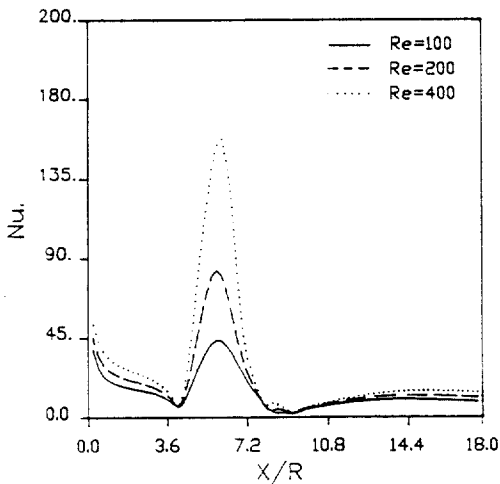


Fig.8 Local Nusselt number for a channel with Case 2.

재부착점 부근에서는 열전달량이 적게 된다. 장애물 후류부에서는 와류에 의한 온도 분포 특징이 나타나고 있다. 여기서 유체의 프란틀 수는 6.78로 하였다. 레이놀즈 수가 증가하면 열경계층의 완전한 전개는 먼 후류에 나타나게 된다.

Fig.8은 Case 2의 대표적인 경우에 대해서 레이놀즈 수 100, 200, 400의 아래등은 가열면에 대한 국소 누셀 수를 나타낸 것이다. 전반적인 누셀 수의 분포는 동일하게 장애물 중심부에서 가장 큰 값을

나타내고, 장애물의 시작 부분에서 낮은 값을 보이고, 장애물 바로 끝 부분에서는 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 강제 대류에 의한 속도에 비하여 열확산 속도가 느리므로, 전체 열전달은 열확산에 의한 분포 보다는 유동 속도에 의한 열전달이 지배적이 되었다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 입구부의 누셀 수는 약간씩 증가되고 장애물의 시작점과 끝점에서는 레이놀즈 수에 무관하게 거의 동일한 값을 나타내며, 장애물 상부에서는 레이놀즈 수의 증가에 따라 누셀 수도 증가함을 볼 수 있다. 이는 열전달이 평판의 표면에 수직인 방향의 전도 열전달에 의하여 온도 분포가 유동 속도에 지배적이 됨을 나타내고 있다.

4.2 실험 결과

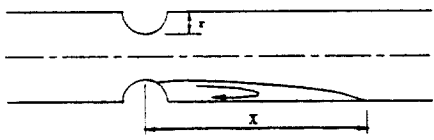
실험은 가시화로서 레이놀즈 수 100, 200에 대하여 실시하였다. 전반적으로 장애물의 형상의 만곡부가 완만할수록, 레이놀즈 수가 낮을수록 장애물 후면에 형성된 와류 유동세포의 크기가 적고 재부착 위치가 상대적으로 앞쪽에 위치함을 볼 수 있었다. 수치 해석 결과와 비교 고찰하기 위하여, 실험 결과를 사진 촬영하여 모델 아랫면만을 도시화하였다. 가시화 결과는 수치 해석 결과와 비교적 잘 일치하였다.

4.3 수치 해석 및 실험 결과 비교

Table 2는 수치 해석 결과와 가시화 결과를 장애물의 중심부로부터 박리점의 위치로서 비교한 것이다.

Fig.9는 레이놀즈 수 100, 200의 반원 장애물(case 1) 형상에 절반 아랫면에서의 유동 함수를 수치 해석 결과 및 유동 가시화로 나타낸 것이다. Fig.9와 Table 2에서 나타낸 것과 같이 전반적인 유동 형태 및 유동장은 수치 해석 결과와 잘 일치하고 있다. 레이놀즈 수 100의 경우에는 수치 해석에 의한 박리점에서 부터 재부착점까지의 거리는 덕트입구 높이의 약 1.47배이며, 가시화로부터 측정된 재부착점까지의 거리도 1.47배를 나타냄으로써 수치 결과와 가시화 결과는 일치하고 있다. 레이놀즈 수 200의 경우에는 수치 해석 결과, 박리점에서 부터 재부착점까지의 거리는 덕트입구 높이의 약 2.49배이며, 가시화로부터 측정된 재부착점까지의 거

Table 2 Comparison of numerical and experimental of the length from separation points to reattachment points on blockage model.



Shape of blockage	Reynolds number	Length from separation to reattachment points		Peak Nusselt number
		Numerical	Experimental	
Semicircular blockage (Cas 1)	Re=100	1.47	1.47	50.5
	Re=200	2.49	2.52	98.0
	Re=400	4.36		171.0
Arcuate blockage (Cas 2)	Re=100	1.30	1.40	45.0
	Re=200	2.20	2.32	87.0
	Re=400	3.36		162.0
Arcuate blockage (Cas 3)	Re=100	1.07		38.0
	Re=200	2.09		60.0
	Re=400	3.62		121.0

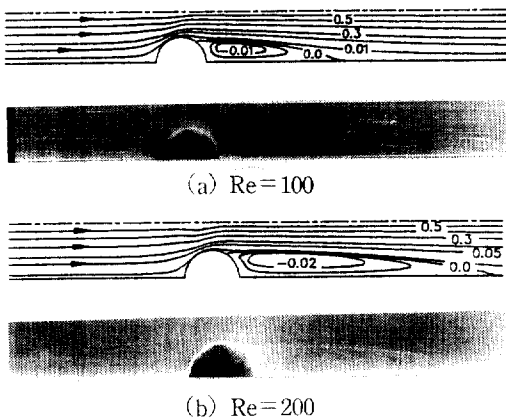


Fig.9 Streamlines and flow-visualization for a channel with semicircular blockage.(Case 1)

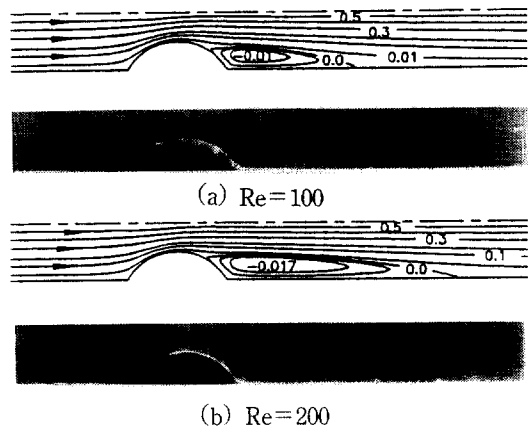


Fig.10 Streamlines and flow-visualization for a channel with arcuate blockage.(Case 1)

리도 2.52배로써 두 결과의 상대 오차는 약 4%를 나타내고 있다.

Fig.10은 타원 장애물(case 2)을 갖는 덕트 유동에 대해 각각 레이놀즈 수 100, 200에 대해서 유동 함수의 수치 해석 결과와 유동 가시화 결과를 나타낸 것이다. Table 2에 나타낸 것과 같이 레이놀즈 수 100의 경우의 박리점에서 부터 재부착점까지의

거리는 수치 해석 결과가 약 1.3배이고 가시화 결과는 1.4배를 나타내고 있다. 또한 레이놀즈 수 200에 대하여 박리점에서 부터 재부착점까지의 거리는 수치 해석 결과가 약 2.2배이고, 유동의 가시화 결과는 2.32배를 나타내고 있다. 위의 결과로써 레이놀즈 수 100, 200에 대한 수치 해석 결과와 가시화 결과의 각각의 상대 오차는 7%, 5%로써 비교적

정확한 결과를 나타내고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 장애물을 갖는 덕트내의 유동장 및 온도장의 특성을 이해하고 장애물 하단부의 와류 유동으로 인한 압력 손실 및 누셀수의 변화를 수치해석 함으로써, 각종 열교환기의 열효율 향상 및 압력 손실에 관한 기초 연구로서 몇가지 결론을 얻을 수 있었다.

높이가 같은 반원 및 타원형 장애물을 갖는 평행 평판내의 유동에 있어서 장애물의 폭에 따라 박리점으로부터 재부착점까지의 와류 유동의 크기의 변화를 알 수 있었으며, 동일한 레이놀즈수에 대한 장애물 폭에 따른 압력강하는 장애물의 곡률 반경이 클수록 작아짐을 알 수 있었다. 그러므로 동일한 입구 유속임에도 불구하고 장애물의 형상 변화에 따라 압력강하의 차가 다르므로, 이에 따른 파이프내의 부식, 퇴적물 또는 용접에 의한 장애물 형성이나 발열봉의 팽창시에 일어나는 유동과 열전달 특성의 예측은 매우 중요하게 생각되며, 앞으로 보다 다양한 형상의 장애물에 대한 연구가 필요하며, 또한 난류 유동의 경우에 있어서도 열전달에 관한 연구가 실시되어야 할 것이다.

단순한 장애물 모델에 대한 가시화를 통한 실험 결과와 수치해석 결과가 비교적 잘 일치됨으로써, 좀더 복잡하고 다양한 장애물 모델에 대한 수치해석과 정성적인 비교 실험을 위해 많은 도움이 되리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Ghia, U., Ghia, K.N., Rubin S.G. and khosla, P.k., "Study of Incompressible flow Separation using Primitive Variables", *Computers&Fluids*, Vol.9, pp.123-142, 1981.
2. Rastogi, A.K., "Hydrodynamics in Tubes Perturbed by Curvilinear Obstructions", *ASME J. of Fluids Eng.*, Vol.106, pp.262-269, 1984.
3. Agrawal, Ajay K., and Sengupta, S., "Laminar Flow and Heat Transfer in Blocked Annuli", *Numerical Heat Transfer*, part A, Vol.15, pp.489-508, 1989.
4. Chen, C.J. and Chen, H.C., "Finite Analytic Numerical Method for Unsteady Two-Dimensional Navier-Stokes Equations", *J. of Computational Physics*, Vol.53, No.2, pp.209-226, 1984.
5. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Co., 1980.
6. Anderson, D.a., Tannehill J.C. and Pletcher, R.H., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", Hemisphere Pub. Co., N.Y., 1984.
7. Thompson, J.F., Thames, F.C., Mastin, C.W., and Shanks, S.P., "Use of the Numerically Generated Body Fitted Coordinated Systems for Solution of the Navier-Stokes Equations", pp.68-80, 1975.
8. Harlow, F.H. and Welch, J.E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", *Phys. Fluids*, Vol.8, pp.2182, 1965.
9. Raithby, G.D. and Schneider, G.E., "Numerical Solution of Problems in Incompressible Fluid Flow : Treatment of the Velocity-Pressure Coupling", *Numerical Heat Transfer*, Vol.2, pp.417-440, 1979.
10. Bejan, A., "Convection Heat Transfer", Wiley-Int. pub, 1984.

1. Ghia, U., Ghia, K.N., Rubin S.G. and khosla, P.k., "Study of Incompressible flow Separation using