

수정멱법칙 비뉴턴유체의 협착관내 유동장해석

Flow Analysis of the Modified Power-Law Non-Newtonian Fluids in the Stenotic Tubes

서 상 호*, 유 상 신**, 장 남 일***
S. H. Suh, S. S. Yoo, N. I. Chang

Key words : Non-Newtonian Fluid(비뉴턴유체), Finite Element Method(유한요소법), Modified Power-Law Model(수정멱법칙 모델), Stenotic Tube(협착관)

Abstract

Steady flows of Newtonian and non-Newtonian fluids in the stenotic tubes with various stenotic shapes are numerically simulated. Validity of the modified power-law model as a constitutive equation for the purely viscous non-Newtonian fluid is discussed and the results of the power-law model are compared with those of the Carreau model, the Powell-Eyring model and experimental data for blood. Flow characteristics and reattachment lengths for non-Newtonian fluids in the stenotic tubes are presented extensively. Also, the analysis is extended to predict the influences of diameter ratio, stenosis spacing, number of stenosis and Reynolds number on the flow characteristics in the multiple stenotic tubes.

기 호 설 명

- | | |
|--|---|
| <p>D : 원관의 지름[m]</p> <p>F : forcing function</p> <p>K : 전체계의 행렬[global system matrix]</p> <p>K_c : 대류행렬[convective matrix]</p> <p>K_d : 대칭행렬[symmetric matrix]</p> <p>K_L : 압력손실계수</p> <p>k : 점성계수 조절상수</p> <p>L : 협착부의 길이[m]</p> <p>m : 멱법칙모델의 컨시스턴트시[Pa · sⁿ]</p> <p>n : 멱법칙 지수</p> <p>p : 정압[Pa]</p> <p>p_0 : 협착관 상류의 정압[Pa]</p> | <p>$4p$: 협착관 입구와 출구의 압력차[Pa]</p> <p>R : 협착부의 반지름[m]</p> <p>R_0 : 원관의 반지름[m]</p> <p>r : 반경방향</p> <p>S : 협착부사이의 간격[m]</p> <p>t : 협착부의 높이[m]</p> <p>U_0 : 평균속도[m/s]</p> <p>u : 축방향 속도[m/s]</p> <p>u_i : 속도텐서</p> <p>v : 반경방향 속도[m/s]</p> <p>z : 축방향</p> <p>z_R : 협착부 중앙으로부터의 재부착길이[m]</p> |
|--|---|

그리스 문자

- | | |
|--|--|
| <p>* 숭실대 기계공학과</p> <p>** 한국항공대 기계설계학과</p> <p>*** 숭실대 대학원 기계공학과</p> | <p>$\dot{\gamma}$: 전단율[s⁻¹]</p> |
|--|--|

- $\dot{\gamma}_0$: 커트오프전단율[s⁻¹]
 ϵ : 압력 penalty parameter
 μ_s : 겔보기점성계수[Pa · s]
 μ_0 : 영전단율 점성계수[Pa · s]
 ρ : 밀도[kg/m³]
 τ : 전단응력[Pa]
 ϕ : 미지변수

1. 서 론

산업용 및 가정용 수도배관을 장기간 사용하면 관의 벽면에 녹이 발생하고, 액체속에 들어있는 부유물이 관벽에 침착하면서 관에 협착현상이 발생된다. 협착현상이 발생되면 일반적으로 송수 압력손실은 커지고 송수량은 급격히 감소된다. 아연 도금 강관을 주로 사용하고 있는 우리나라의 가정용 수도배관은 물 소독에 사용되는 염소가 부식을 촉진하기 때문에 노후화된 배관에는 연속적이고 복합적인 협착현상이 발생되어 송수량을 급격히 감소시키고, 송수동력을 크게 한다.¹⁾ 이러한 협착 현상은 인체의 혈관에서도 발생된다. 상처를 입은 혈관의 내피세포가 혈액에 섞여 있는 콜레스테롤이나 중성지방과 같은 부유물의 생화학적 작용으로 동맥 내부벽에 동맥경화성반점(atherosclerotic plaque)이 발생되고 동맥이 외부의 충격을 받음으로써 혈관이 부분적으로 좁혀지거나 막히는 경우가 발생한다. 혈관내에 협착현상이 발생되면 혈액유동은 감소되고 혈압이 증가된다.²⁾

물이나 공기와 같은 뉴턴유체에 대한 협착관내의 유동특성에 대한 연구는 많이 발표되어 있으나, 고분자물질이나 혈액과 같은 비뉴턴유체의 협착관 내 유동특성에 관한 연구는 별로 발표된 바 없으며, 최근에 와서 중요한 연구과제로 대두되고 있다. 현재까지 협착부가 있는 원관유동에 관하여 발표된 연구결과들³⁻⁸⁾을 종합해 보면 협착부의 형상은 급격축소-급격확대(sudden contraction-sudden expansion) 형상과 점차축소-점차확대(gradual contraction-gradual expansion) 형상으로 구분할 수 있다. 대부분의 연구는 원관에 한개의 협착부가 설치되어 있는 경우에 대한 연구이며, 여러개의 협착부가 설치되어 있는 협착관에 대한 연구는 많지 않다.⁵⁻⁸⁾

본 연구에서는 점차축소-점차확대 및 급격축소

-급격확대 형상을 갖는 원관속으로 수정떡법칙모델로 나타낼 수 있는 비뉴턴유체가 흐를 때 비뉴턴유체의 유동특성과 재부착길이에 대해 검토하고, 점차축소-점차확대 형상의 협착부가 주기적으로 설치되어 있는 원관내 비뉴턴 유체유동을 수치해석하여 협착비율, 협착부사이의 거리 및 협착부의 수가 유동장에 미치는 영향을 결정하고자 한다.

2. 지배방정식

비압축성 유체의 정상상태 유동에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{i,i}=0 \quad (1)$$

$$\rho u_j u_{i,j} = -p_{,i} + \tau_{ij,j} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 하첨자는 텐서의 index를 나타내고, u_i 와 τ_{ij} 는 각각 속도와 전단응력텐서이다. 순수점성 비뉴턴유체의 유동문제를 해석하기 위하여 유변학적 성질을 전단율의 함수로 나타낼 수 있는 구성방정식이 필요하다. 많은 구성방정식중에서 본 연구에서는 떡법칙모델(power-law model)을 채택하였다. 떡법칙모델은 방정식 형태가 단순할 뿐만 아니라, 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 유동특성을 비교·연구하는데 적합한 모델로 알려져 있다.^{7,9-11)}

비압축성 유체의 순수 전단유동에서 전단응력과 전단율의 관계는 다음과 같은 떡법칙모델로 나타낼 수 있다.

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

식 (3)에서 두 파라미터 m 과 n 은 떡법칙모델을 사용할 때 비뉴턴유체의 유변학적 성질을 나타내는 상수이다. 지수 $n < 1$ 인 유체를 전단박화유체라 하며, 고분자물질이나 혈액과 같은 유체는 이러한 특성을 갖는다. 비뉴턴유체의 점성계수는 식 (3)을 변형하여 겔보기점성계수(apparent viscosity)로 나타내는 것이 편리하다.

$$\mu_a = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

전단율이 아주 크지 않을 때 비뉴턴유체의 특성이 유동현상에 미치는 영향을 명확히 모사하기 위해서는 멱법칙모델을 수정한 수정멱법칙모델(modified power-law model)을 적용하는 것이 효과적이다. 수정멱법칙모델에서 겔보기 점성계수는 뉴턴유체의 점성계수인 μ_0 와 커트오프(cut-off) 전단율 $\dot{\gamma}_0$ 의 값을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁷⁾

$$\mu_c = \begin{cases} \mu_0 k \dot{\gamma}_0^{n-1} & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0 \\ \mu_0 k \dot{\gamma}^{n-1} & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, k 는 점성계수 조절상수이다.

비뉴턴유체의 겔보기점성계수 μ_c 를 이용하여 비압축성, 비뉴턴 유체의 정상유동에 대한 운동량방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho u_{i,j} = -p_{,i} + \mu_{c,i,j} \quad (6)$$

3. 해석방법

본 연구에서는 정상, 2차원, 비압축성, 비뉴턴유체 유동에 대한 지배방정식을 풀기 위하여 Galerkin 방법에 의한 유한요소법을 적용하여 다음과 같은 비선형 대수방정식을 구하였다.

$$K(\phi)\phi = F \quad (7)$$

여기서, $K(\phi)$ 는 전체계의 행렬(global system matrix)이고, ϕ 는 속도 또는 압력과 같은 미지변수이며, F 는 체력과 경계조건을 포함하는 Forcing Function이다.

위 행렬의 자유도를 줄이기 위해 미지압력을 식 (8)과 같이 나타내는 Penalty Function Method¹²⁾를 이용하였다.

$$\mu_{i,i} = \epsilon p \quad (8)$$

여기서, ϵ 의 값은 1×10^{-6} 이다. ϵ 이 작을수록 운동량방정식의 압력항을 쉽게 소거할 수 있다.

압력 Penalty 함수를 사용하여 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(\phi) = K_c(\phi) + K_p \quad (9)$$

식 (9)의 $K_c(\phi)$ 는 운동량방정식의 대류항에서 생기는 비대칭 대류행렬이고, K_p 는 확산항, 압력항, 연속방정식의 대칭 분포이다.

식 (9)의 비선형 행렬을 풀기 위하여 운동량방정식의 대류항은 두개의 다른 반복법 즉, 연속대입법(sucsesive substitution method)으로 알려져 있고 고정점반복법(fixed point iteration method)과 Quasi-Newton방법¹³⁾을 조합하여 선형화시키고, 선형화된 행렬은 Gauss소거법으로 풀었다. 방정식의 해석을 위해 FDI(Fluid Dynamics International)사의 Fidap-code¹²⁾를 이용하였다.

계산시간을 줄이기 위해 협착관 유동문제는 원통좌표계상의 축대칭선 윗쪽부분만 수치계산하였고, 축대칭선의 경계조건은 반경방향 속도성분을 0으로 하고 출구조건은 완전히 발달된 유동조건으로 하였다. 또한 속도에 대한 상대오차가 0.001이하이면 수렴하는 것으로 보았다.

계산에 사용된 컴퓨터의 기종은 CONVEX사의 CONVEX C120이다. 계산된 결과는 SUN SPARCstation을 이용하여 HP Paint Jet XL 프린터로 출력하였다.

4. 계산결과 및 고찰

4.1 비뉴턴유체의 유변학적 성질

전단박화유체의 유변학적 성질을 수정멱법칙모델로 나타내기 위해 Fig.1에 전단율의 변화에 따른 겔보기점성계수를 도시하였다. 멱법칙모델은 전단율이 0에 가까운 영역에서는 겔보기점성계수가 무한히 커지는 특성을 가지고 있으므로 실제유체를 모사하는데 적합하지 못하다. 멱법칙모델을 변형한 수정멱법칙모델에서는 전단율이 0에 가까운 영역에서는 커트오프하여 뉴턴유체의 점성계수와 같이 일정하게 해준다. 본 연구에서는 커트오프 전단율의 값을 변화시켜도 관내 유동의 속도분포와 압력변화에 영향을 거의 나타내지 않는 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0$ 일때는 지수 n 의 값에 관계없이 동일한 겔보기점성계수를 나타내지만, 전단율이 $\dot{\gamma}_0$ 보다 큰 영역에서는 지수 n 이 작아질수록 겔보기점성계수는 점점 작아진다.

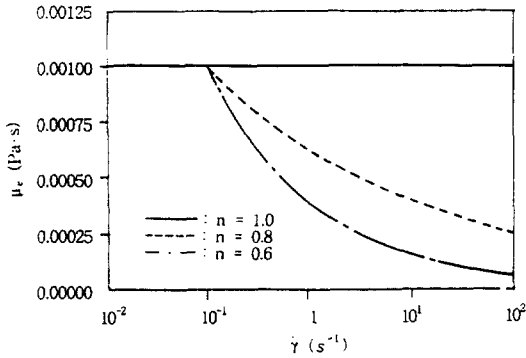


Fig.1 Apparent viscosity versus shear rate for the modified power-law model

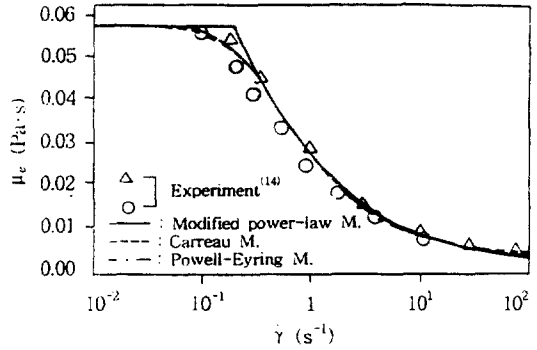


Fig.2 Rheological property of human blood

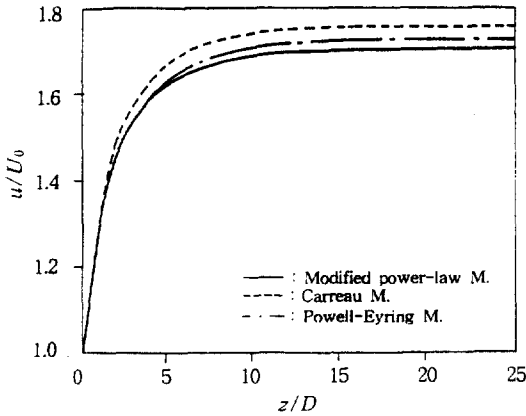


Fig.3 Centerline velocity of blood flow for different rheological model

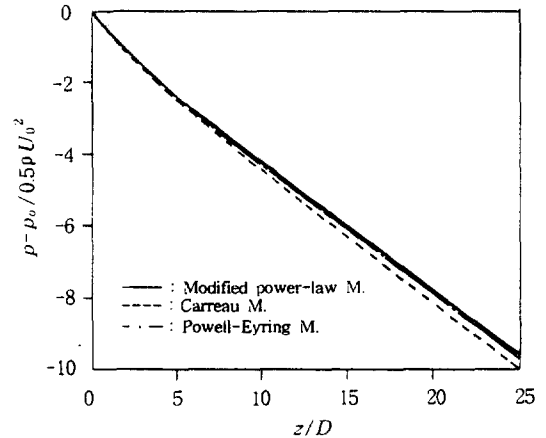


Fig.4 Centerline pressure variation of blood flow for different rheological model

전단박화유체의 유변학적 성질을 갖는 것으로 알려진 혈액에 대한 전단율과 겔보기점성계수의 관계를 Fig.2에 나타내었다. 실험결과와 혈액의 전단율-겔보기점성계수의 상관관계를 잘 나타내는 것으로 알려진 Carreau 모델¹⁴⁾과 Powell-Eyring 모델¹⁶⁾에 의한 결과와 본 연구에서 채택한 수정멩법칙 모델의 결과를 비교하였다. 혈액을 수정멩법칙 모델로 나타낼 때 컨시스턴시는 실험결과로부터 각각 $n=0.53$, $m=0.0271 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 을 얻을 수 있다. 수정멩법칙 모델과 다른 모델에 대해 전단율-겔보기점성계수의 상관관계를 모사한 결과와 실험결과를 비교하여 보면 세 모델의 결과가 모두 대체적으로 일치한다는 것을 알 수 있다.

혈액의 유변학적 성질을 Carreau 모델, Powell-Ey-

ring 모델과 수정멩법칙 모델로 나타낼 때 상류관의 질량유량이 0.0081 kg/sec 로 일정한 원관내의 혈액 유동에 대한 중심선 속도변화와 압력변화를 각각 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다. U_0, p_0 는 각각 관 입구의 평균속도 및 정압이며, u, p 는 입구로부터의 임의의 거리에 있는 점에서의 중심선상의 속도 및 정압이다. 속도분포는 수정멩법칙 모델을 사용하여 계산한 결과가 Carreau 모델과 Powell-Eyring 모델의 결과보다 약간 낮게 나타나는데, 그 차이는 각각 3%와 1.5% 이내이다. 또한 수정멩법칙 모델을 적용하여 계산한 원관내의 압력분포는 Carreau 모델과 Powell-Eyring 모델의 결과보다 약간 높게 나타나지만, 세 모델의 계산 결과는 대체로 일치한다. 이 결과로부터 현차관내 멩법칙 비뉴턴유체 유동에 대

한 수정벽법칙모델의 적용은 그 타당성이 있다고 할 수 있다.

4.2 단일 협착부가 있는 원관 유동

비뉴턴유체의 구성방정식중에서 수정벽법칙 모델을 이용하여 원관내에 급격축소-급격확대 협착부와 점차축소-점차확대 협착부가 설치되어 있을 때의 유동특성을 해석하였다. 점차축소-점차확대부는 축소 및 확대부가 직선으로 변화되는 경우와 코사인곡선의 형태로 변화되는 경우로 구분하였다. 수치해석에 사용된 협착관의 기하학적인 형상은 Fig.5와 같다. 그림에서 2점쇄선은 급격축소-급격확대 협착관의 경계면을, 점선은 축소 및 확대부가 직선으로 변하는 점차축소-점차확대 협착관의 경계면을 그리고 실선은 경계면이 식 (10)과 같은 코사인곡선으로 된 점차축소-점차확대 협착관을 나타낸다.

$$R(\ell) = R_0 - \frac{t}{2} \left\{ 1 + \cos \frac{\pi \ell}{L/2} \right\} \quad (10)$$

여기서 R_0 , t , L 는 각각 원관의 반지름, 협착부의 높이와 협착부의 길이이다.

수치계산은 $t = R_0/2$ 와 $L = 2R_0$ 의 상관관계를 가지며, 원관의 입구경계면에서 협착부가 시작되는 점까지의 거리는 $8R_0$ 이고, 협착이 끝나는 곳에서 출구경계면까지의 거리는 $16R_0$ 인 경우에 대하여 수행하였다.

4.2.1 뉴턴유체

Fig.5와 같은 3가지 다른 형상을 갖는 협착관에 관한 뉴턴유체유동의 축방향속도와 압력변화를 각각 Fig.6과 Fig.7에 나타내었다. 그림에서 S.C.-S.E.는 급격축소-급격확대 협착관을 나타내며, G.C.-G.E(linear)와 G.C.-G.E(cosine)는 각각 축소 및 확대부가 직선으로 변하는 점차축소-점차확대 협착관과 코사인 곡선의 형상을 갖는 점차축소-점차확대 협착관을 나타낸다. 축소 및 확대부가 직선으로 변하는 점차축소-점차확대 협착관과 코사인 곡선의 형상을 갖는 점차축소-점차확대 협착관에서의 속도특성과 압력손실은 큰 차이를 보이지 않으나, 협착부가 급격히 변하는 급격축소-급격확대 협착관은 점차축소-점차확대 협착관의 경우

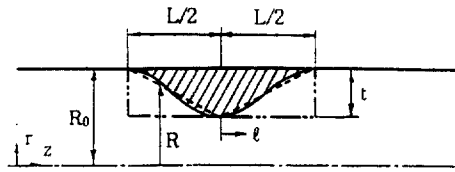


Fig.5 Geometric configuration for a stenotic section

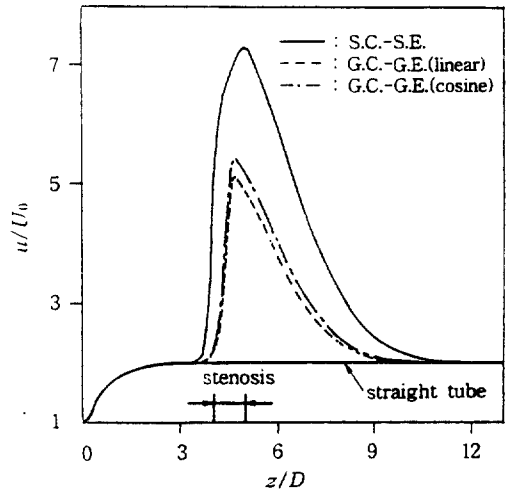


Fig.6 Centerline velocity variation along stenotic tubes for a Newtonian fluid

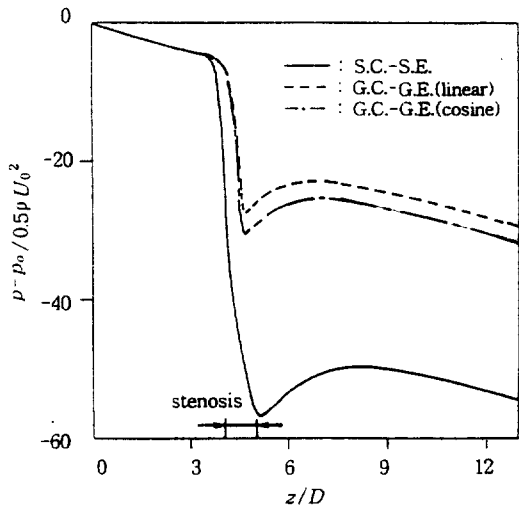


Fig.7 Centerline pressure variation along stenotic tubes for a Newtonian fluid

보다 부차적 손실이 크며, 중심선 속도도 크게 증가하고 압력손실도 크게 나타난다.

레이놀즈수의 변화에 따른 무차원 재부착길이를 Fig.8에 도시하였다. 협착관에서 확대부 후류의 재부착길이는 레이놀즈수가 증가할수록 길어진다. 급격축소-급격확대 협착관의 재부착길이는 점차축소-점차확대 협착관보다 레이놀즈수의 영향을 크게 받고 있다.

4.2.2 비뉴턴유체

두가지 유형의 점차축소-점차확대 협착관내 뉴턴유체의 유동특성은 큰 차이를 보이지 않았으므로, 협착관내 비뉴턴유동문제는 실제적인 협착부의 경계면을 이상화한 식 (10)과 같은 코사인 곡선으로 된 점차축소-점차확대 협착관에 대해서만 수치계산하였다.

입구 레이놀즈수가 50인 역법칙 비뉴턴유체가 협착부를 흐를 때 중심선상의 속도와 압력을 각각 Fig.9와 Fig.10에 나타내었다. 협착부의 상류에서 n 이 작을수록 중심선상의 속도가 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 n 이 작을수록 주어진 단면에서 속도분포가 평탄해지고 최대속도가 감소하기 때문이다.²⁾ n 값의 변화에 따른 중심선상의 속도 특성은 협착부의 하류에서도 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 협착부로 인한 속도의 변화는 n 이 클수록 최대속도가 크게 나타나고 협착으로 인한 급격한 속도

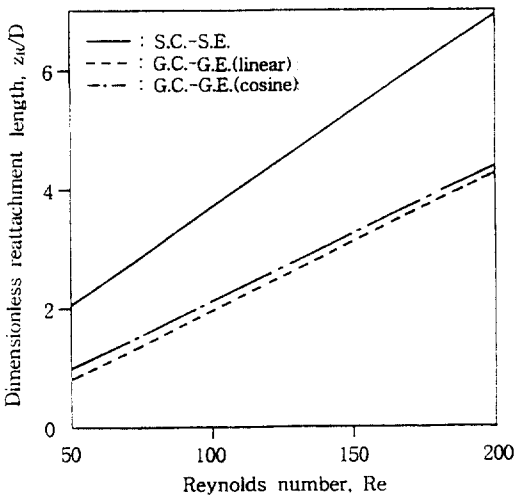


Fig.8 Reattachment length of a Newtonian fluid for different stenotic shapes

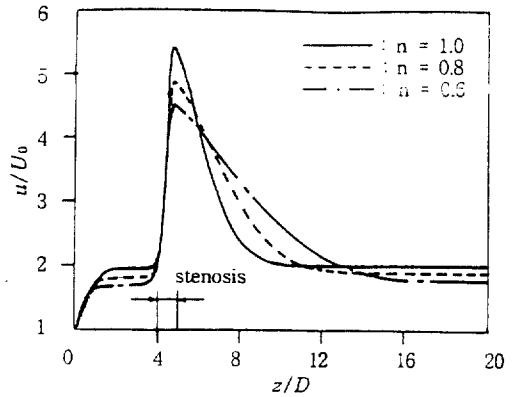


Fig.9 Centerline velocity in the cosine-curved stenotic tubes for power-law fluids

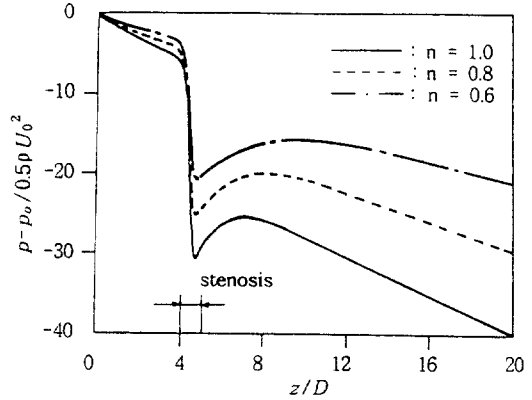


Fig.10 Centerline pressure in the cosine-curved stenotic tubes for power-law fluids

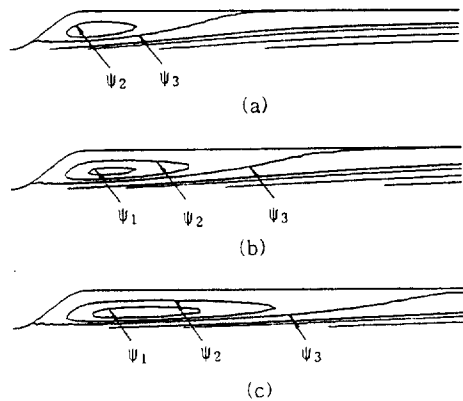


Fig.11 Streamline contours in the stenotic tubes for the power-law fluids ($\psi_1 = 0.83E-6$, $\psi_2 = 0.81E-6$, $\psi_3 = 0.7854E-6$) : (a) $n = 1.0$, (b) $n = 0.8$, (c) $n = 0.6$

감소를 나타낸다. 협착부 상류에서는 지수 n 이 작을수록 압력강하가 작게 나타나며, 협착부로 인한 최저압력은 지수 $n=1$ 인 뉴턴유체에서 나타난다. 협착부 입구 직전과 직후의 압력강하는 지수 n 이 클수록 크게 나타남을 알 수 있고, 협착부의 후류에서 압력이 회복되는 경향은 모든 n 의 값에 대하여 대체로 동일함을 알 수 있다.

레이놀즈수가 50이고, 축소 및 확대부가 코사인 곡선의 형상을 갖는 점차축소-점차확대 협착관에서의 유선도를 Fig.11에 나타내었다. 지수 n 이 작을수록 재순환영역의 크기가 크며 재부착길이가 길어짐을 알 수 있다.

4.3 주기적인 협착부가 있는 원관유동

4.3.1 수치해의 검증

Fig.5와 같은 협착부가 협착부사이의 거리 S 로 연속되어 있는 협착관내의 유동특성은 협착부의 수, 협착부사이의 거리 그리고 레이놀즈수가 중요한 인자인 것으로 알려지고 있다.²⁸⁾ 이들 유동파라미터가 유동장에 미치는 영향을 해석하기 위하여 먼저, 협착부의 경계면이 선형으로 이루어진 두개의 점차축소-점차확대부가 연속되어 있는 협착관내 유동특성을 수치계산하여 그 결과를 실험자료⁸⁾와 비교하여 수치계산의 타당성을 검토하였다. Fig.12에 레이놀즈수의 변화에 따른 압력손실계수를 나타내었다. 압력손실계수 K_L 은 $4p/0.5\rho U_0^2$ 으로 정의한다. 이때 $4p$ 는 협착관 입구와 출구의 압력차를 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 수치계산한 압력손실계수는 엄밀해 및 실험결과와 거의 같은 경향을 나타내고 있으나 모든 레이놀즈수에서 엄밀해보다 약간 크게 나타나며, 실험결과보다는 작게 나타난다. 본 연구에서 구한 수치계산값은 엄밀해에 더욱 근접함을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 입구유동조건이 균일유동이고, 협착부의 경계면이 코사인 곡선으로 이루어진 주기적인 협착관내의 유동특성을 고찰하기 위하여 협착부사이의 간격 S 는 $R_0, 2R_0, 4R_0$, 협착비 t/R_0 는 $1/2, 1/3, 1/4$, 유동지수 n 은 $1, 0.8, 0.6$ 그리고 협착갯수를 $1, 2, 4, 10$ 으로 변화시키면서 이들 유동파라미터가 유동장에 미치는 영향을 해석하였다.

4.3.2 뉴턴유체

레이놀즈수가 400이고, 협착비가 $1/2$ 이며, 협착부사이의 간격이 $2R_0$ 일 때, 협착부가 1개 내지 10개가 있는 원관에서 뉴턴유체의 축방향 중심선상의 속도변화와 압력변화를 각각 Fig.13과 Fig.14에 나타내었다. 협착부의 수가 증가할수록 협착부의 속도는 점차 커지지만 속도의 증가비율은 점점 감소하고, 협착부가 끝나는 지점부터는 협착이 없는 일정단면적 원관유동의 속도분포와 일치함을 알 수 있다. 협착부의 수가 증가할수록 압력손실은 커지며 협착부를 지난 이후에는 서서히 정압이 회복되고, 일정단면의 원관내 유동과 동일한 압력강하를 나타낸다.

협착비의 영향을 고찰하기 위하여 레이놀즈수가 400이고, 협착부사이의 거리가 $2R_0$ 이며, 협착부의 수가 10개일 때, 협착비가 중심선상의 속도변화와 압력변화에 미치는 영향을 Fig.15와 Fig.16에 나타내었다. 수치계산결과로부터 협착비 t/R_0 의 값이 커짐에 따라 뉴턴유체에서 중심선상의 속도변화와 압력변화는 크게 나타난다.

4.3.3 비뉴턴유체

레이놀즈수가 200이고, 협착부의 간격과 협착비가 각각 $2R_0$ 와 $1/2$ 이며, 협착부의 수가 10개일 때, 떡법칙지수 n 의 변화에 따른 비뉴턴유체의 중심선상의 축방향속도와 압력변화를 각각 Fig.17 및 Fig.18

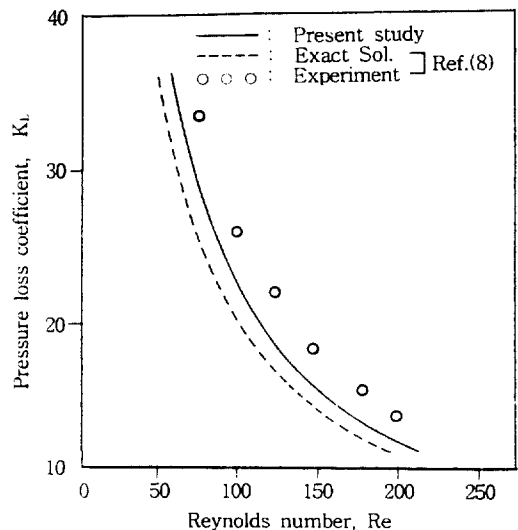


Fig.12 Pressure loss coefficient of a Newtonian fluid for multiple stenotic tubes

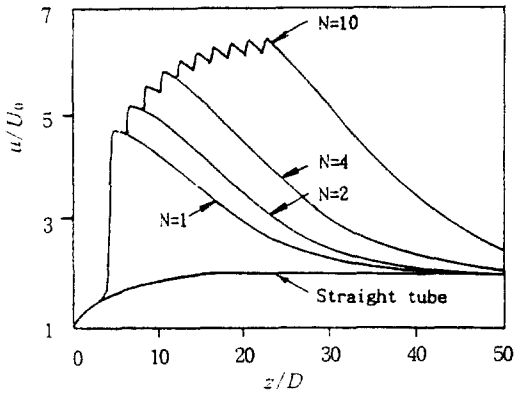


Fig. 13 Effect of number of stenosis on the centerline velocity for a Newtonian fluid at $Re=400$

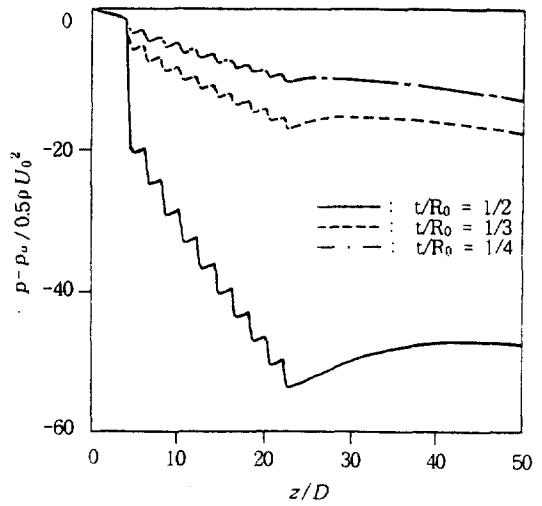


Fig. 16 Effect of the stenosis diameter ratio on the centerline pressure for a Newtonian fluid

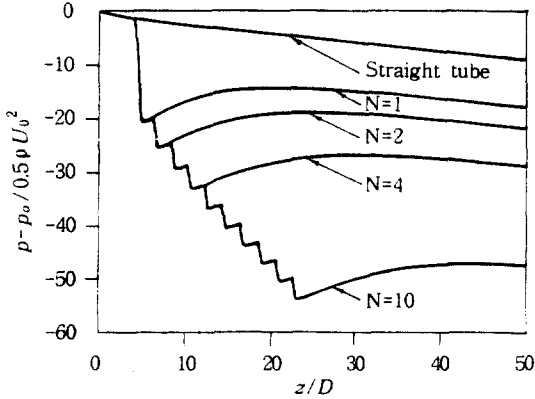


Fig. 14 Effect of number of stenosis on the centerline pressure for a Newtonian fluid at $Re=400$

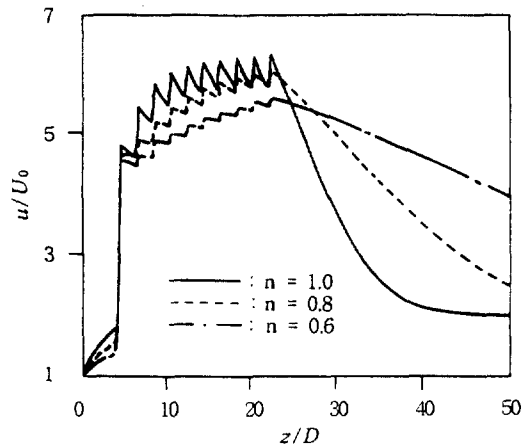


Fig. 17 Centerline velocity in multiple stenotic tubes for the power-law fluids

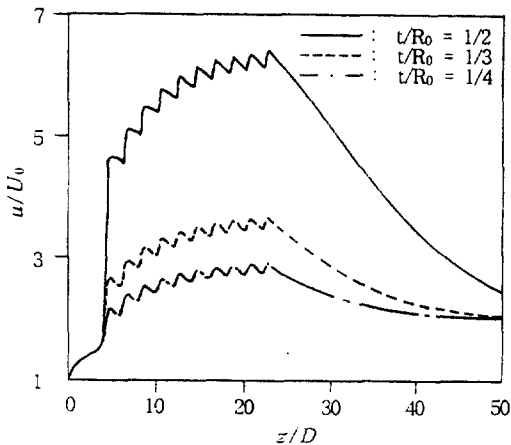


Fig. 15 Effect of the stenosis diameter ratio on the centerline velocity for a Newtonian fluid

에 나타내었다. 수정벽법칙모델에서 지수 n 이 감소할수록 전단율이 큰 영역에서의 겔보기점성계수는 작아진다. 여러개의 협착부가 설치된 부분에서는 n 의 값이 작을수록 중심선상의 속도는 감소하고 협착부를 지난 뒤의 속도는 서서히 일정단면적의 원관속도로 회복된다. 압력손실은 n 이 작을수록 작게 나타나고, 협착부로 인한 급격한 압력강하가 발생하며, 마지막 협착부를 지난 다음에는 급격한 압력강하 후 서서히 압력이 회복되는 것을 알 수

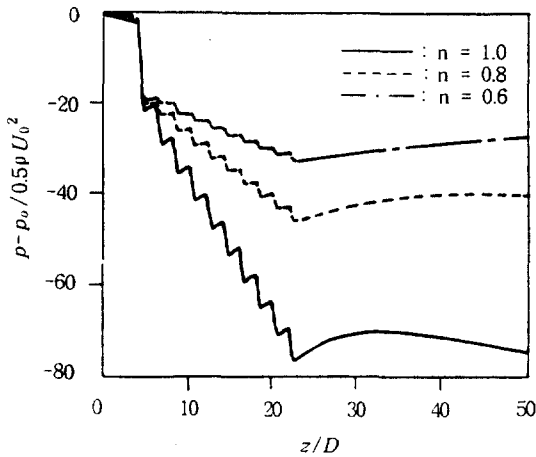


Fig.18 Centerline pressure in multiple stenotic tubes for the power-law fluids

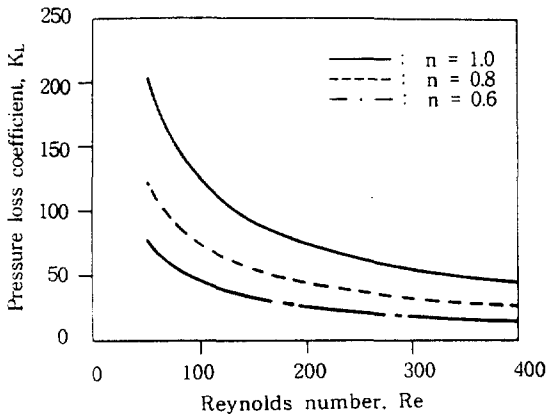


Fig.19 Pressure loss coefficient of the power-law fluids for different Reynolds numbers

있다. 동일한 갯수의 협착부를 가진 관에서 n 이 압력강하에 미치는 영향은 대단히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 떡법칙 비뉴턴유체의 걸보기점성계수가 전단율에 따라 크게 다르게 나타나며 협착부 구간의 유동특성과 결부되어 나타내는 현상으로 사료된다.

협착부의 간격과 협착비가 각각 $2R_0$ 와 $1/2$ 이며, 협착부의 수가 10개일 때 수정떡법칙 비뉴턴유체의 레이놀즈수 변화에 따른 압력손실계수를 Fig.19에 나타내었다. 레이놀즈수가 증가할수록 비뉴턴유체에 대한 압력손실계수는 모든 n 값에 대해 감소한다. 또한, 레이놀즈수가 동일할 때 떡법칙지수 n 이 작

아질수록 압력손실계수는 감소한다. 레이놀즈수가 작은 범위에서는 모든 n 에 대해 압력손실계수는 급격하게 감소하지만, 레이놀즈수가 약 200이상이 되면 압력손실계수는 완만하게 감소한다.

5. 결 론

협착관이 설치된 원관내에 뉴턴유체와 떡법칙 비뉴턴유체가 흐를 때 유동문제를 유한요소법으로 수치계산한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 뉴턴유체에서 급격축소-급격확대 형상을 갖는 협착관 유동은 점차축소-점차확대 형상을 갖는 협착관 유동보다 압력손실이 크며, 확대부 후류의 재부착길어도 길다.

2) 협착부가 주기적으로 설치된 원관내의 유동에서는 협착부의 수가 증가할수록 협착관의 중심선속도와 압력손실은 증가한다.

3) 여러개의 협착부가 주기적으로 설치된 원관내의 유동특성은 입구유동조건이 균일유동인 경우와 완전히 발달된 유동인 경우에 큰 차이를 나타내지 않는다.

4) 협착부형상이 동일할 때 협착비율이 커질수록 중심선상의 속도와 압력손실은 증가한다.

5) 주어진 레이놀즈수에서 떡법칙 지수 n 이 작을수록 협착부내의 중심선상의 속도는 감소하고 압력강하도 낮게 나타난다.

6) 지수 n 이 일정한 비뉴턴유체에서 레이놀즈수가 증가할수록 압력손실계수는 감소하며, 이 현상은 모든 n 의 값에 대하여 동일한 경향을 나타낸다.

후 기

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 첨단유체공학연구센터의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

1. 박상언, 윤재복, 유상신, 1992, "협착관내에서 비뉴턴유체의 유동특성에 관한 연구", 공기조화·냉동공학 하계학술발표 논문집, pp.7~12.
2. Young, D.F., 1979, "Fluid mechanics of arterial

- stenosis", ASME J. Biomechanical Eng., Vol. 101, pp.157~175.
3. Shin, B.R., Nagatomo, H., Ikohagi, T. and Daiguji, H., 1992, "Numerical simulation of blood flow through a vascular stenosis", The 5th Asian Congress of Fluid Mechanics, Taejon, Korea, pp.17~20.
 4. Siouffi, M., Pelissier, R., Farahifar, D. and Rieu, R., 1984, "The effect of unsteadiness on the flow through stenosis and bifurcation" J. Biomechanics, Vol.17, No.5, pp.299~315.
 5. Sealey, B.D. and Young, D.F., 1976, "Effect of geometry on pressure losses across models of arterial stenosis", J. Biomechanical Eng., Vol.9, pp.439~448.
 6. Gould, K.L., Lipscomb, K. and Hamilton, G.W., 1974, "Effect of coronary flow reserve and resistance", American J. Cardiology, Vol.34, pp.48~55.
 7. 서상호, 유상신, 1993, "떡법칙 비뉴턴유체의 협착관내 유동장 해석", 공기조화·냉동공학 하계학술발표 논문집, pp.49~54.
 8. 양인균, 1988, 협착관 및 외부압에 의한 압출관내의 유동특성에 관한 연구, 홍익대학교 박사학위논문.
 9. Yoo, S.S., 1993, "Physical properties and heat transfer in tube flows of non-Newtonian fluids", The 6th Int. Symp. on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Vol. II, Seoul, Korea, pp.61~70.
 10. 박심수, 이현순, 1992, "환상 덕트내의 수정떡법칙유체 유동에 대한 압력강하", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, pp.28~33.
 11. Morales, J.C., and Campo, A., 1993, "Analysis of mixed convection of a non-Newtonian fluid in a cavity with a uniformly moving wall", The 6th Int. Symp. on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Vol. II, Seoul, Korea, pp.37~42.
 12. Fidap Theoretical Manual, 1992, Revision 6.04, Vol. I, Fluid Dynamics International Inc., III., USA.
 13. Dennis, J. and More, J., 1965, "Quasi-Newton method, motivation and theory", SIAM Rev., Vol.19.
 14. Cho, Y.I. and Kensey, K.R., 1989, "Effects of the non-Newtonian viscosity of blood on hemodynamics of diseased arterial flows", Advances in Bioengineering, Vol.15, pp.147~158.