

# 삼각형 단면 덕트 내의 Shear-Thinning 유체에 대한 열전달 촉진에 관한 연구

이동렬<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

## A Study on Heat Transfer Enhancement for a Shear-Thinning Fluid in Triangular Ducts

Dong-Ryul Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

**요 약** 본 연구는 열교환기의 효율적인 설계를 위하여 열교환기 내의 삼각형 단면 덕트의 비뉴턴 유체의 압력강하 및 대류 열전달을 수치해석적으로 수행하였다. 비뉴턴 유체의 구성방정식은 기존의 비뉴턴 유체 멱법칙을 보완한 수정 멱법칙 모델을 채택하였다. 덕트 내의 압력강하를 의미하는 마찰계수와 수정 레이놀즈 수의 곱은 기존 연구의 문헌치와 비교할 때 뉴턴 유체 영역과 비뉴턴 멱법칙 영역에서 각각 0.13% 및 2.85% 내에서 일치함을 보였고 비뉴턴 수정멱법칙 유체 모델의 형태를 띠는 Shear-Thinning 유체를 열교환기 내의 삼각형 단면 덕트 내에서 사용하면 뉴턴 유체보다 62%의 압력강하를 감소시켰고 12%의 대류 열전달 향상을 발생시킬 수 있었다.

**Abstract** The prediction of heat transfer and pressure drops in the exchanger passages is a clue to the problem of heat exchanger design. In order to make such predictions for non-Newtonian fluids, it is necessary to know the relation between the viscous properties of the fluid and the wall shear rate in the duct. This study deals with the limits of validity of the power law equation. The useful methodology of the present research involves a consideration of a more general equation which has power law and Newtonian behavior as asymptotes. It is concluded that use of the power law equation outside of its applicability range can lead to serious errors in predicting the heat transfer and pressure drops. The present computational results of the friction factors times Reynolds number for shear-thinning fluid flows in a triangular duct are compared with previous published results, showing agreement with 0.13 % in Newtonian region and 2.85 % in power law region. These shear-thinning fluid results also showed the 12% increase of convective heat transfer enhancement compared with Newtonian heat transfer.

**Key Words** : Shear-Thinning Fluid, Modified Power Law, Non-Newtonian Fluid, Shear Rate Parameter, Triangular Duct

### 기호 설명

		$b^+$ : 이등변삼각형의 무차원 높이	[-]
		$d_h$ : 수력 직경	[m]
		$d_{ij}$ : 전단율 텐서	[1/s]
$a$ : 이등변삼각형의 밑변의 길이	[m]	$f$ : Darcy 마찰계수 ( $2(dp/dx)d_h/\rho u^2$ )	[-]
$a^+$ : 이등변삼각형의 무차원 밑변의 길이	[-]	$K$ : 멱법칙 상수	[Ns <sup>n</sup> /m <sup>2</sup> ]
$B_1$ : 무차원 Kozicki 계수	[-]	$n$ : 멱법칙 유동지수	[-]
$B_2$ : 무차원 Kozicki 계수	[-]	$Re_{ah}$ : 뉴턴 유체의 레이놀즈수 ( $\rho u d_h/\eta_0$ )	[-]
$b$ : 이등변삼각형의 높이	[m]		

\*교신저자 : 이동렬(dlee@cu.ac.kr)

접수일 11년 07월 04일

수정일 11년 08월 30일

게재확정일 11년 09월 08일

$Re_g$ : 벽법칙 유체의 레이놀즈수( $\rho \bar{u}^2 d_h^n / K$ )	[-]
$Re_M$ : 수정벽법칙 유체의 레이놀즈수( $\rho \bar{u} d_h / \eta^*$ )	[-]
$u$ : 유동방향의 유체속도	[m/s]
$\bar{u}$ : 유동방향의 평균유체속도	[m/s]
$u^+$ : 유동방향의 무차원 유체속도( $u/\bar{u}$ )	[-]
$u^{++}$ : 유동방향의 무차원 유체속도( $2u^+ / f \cdot Re_M$ )	[-]
$\beta$ : 전단율 파라메타( $(\eta_0/K)(\bar{u}/d_h)^{1-n}$ )	[-]
$\dot{\gamma}$ : 전단율	[1/s]
$\eta_a$ : 겔보기 점성계수( $\tau / \dot{\gamma}$ )	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\eta_0$ : 전단율 영일 때의 점성계수	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\eta^*$ : 기준 점성계수 ( $\eta_0/(1+\beta)$ )	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\eta^+$ : 무차원 점성계수 ( $\eta_a/\eta^*$ )	[-]
$\rho$ : 유체밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$ : 전단응력	[N/m <sup>2</sup> ]

### 1. 서론

덕트 내의 유체 유동에서 압력강하 및 열전달률의 예측은 열교환기 설계 응용분야에서 에너지 효율 향상을 위하여 매우 중요한 설계인자라고 알려져 있다.

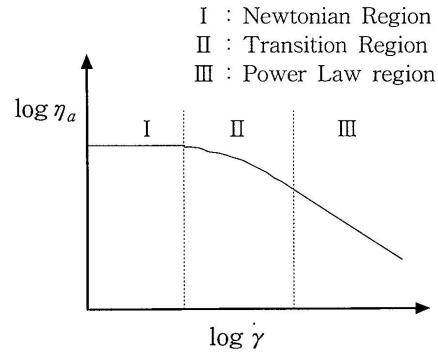
삼각형 단면 파이프 내에서의 층류 유동의 압력강하 및 열전달 특성의 연구는 기존 상용 덕트의 열교환기의 첨단 액체 냉각 장치의 지속적인 연구를 위한 중요한 설계 기반자료로 활용되리라 예측된다.

완전히 발달된 층류유동의 경우 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체의 압력강하 및 열전달 특성은 여러 계산결과와 실험을 통하여 검증되었다. 삼각형 단면을 갖는 덕트내의 완전히 발달된 층류 유동의 압력강하 및 열전달 특성에 관한 해석은 전형적인 일정 벽 온도(CWT: Constant Wall Temperature) 및 일정 열유속(CHF: Constant Heat Flux) 열 경계 조건에 대한 결과가 제안되었다.

뉴턴의 유체에 대한 압력 강하 및 열전달 특성에 관한 연구는 Shah 및 London[1], Sparrow[2], Migay[3], Eckert 및 Irvine[4]에 의해 수행되었고 벽법칙 뉴턴 유체의 경우는 Kozicki[5], Cheng[6]에 의해 수행되었다.

비뉴턴 유체공학에서는 벽법칙 유체로 가정하여 해석하는 것이 보통이지만 비뉴턴 유체의 점성에 관련된 여러 물성치들은 전단율의 값에 따라 변하는 경우가 대부분이다. Shear-Thinning 비뉴턴 유체의 점성 계수는 그림 1에서 보듯이 작은 전단율 영역에서 뉴턴 유체의 성질을 갖고 아주 큰 전단율 영역에서는 벽법칙 유체의 성질을 갖는다. 이 두 영역 사이는 전이영역이다. 또 벽법칙 유체의 모델링에는 덕트의 중심에서 전단율이 0일 때에도 전

단응력은 유한값을 가지므로 겔보기 점성계수가 무한대의 값을 갖는 모순이 있다. 그 래서 Shear-Thinning 유체의 넓은 전단율 영역을 동시에 표현할 수 있는 구성방정식이 필요하다. Sutterby[7], Cross[8], Carreau등[9]이 여러가지 구성방정식의 모델을 제안하였으나, Dunleavy 및 Middleman<sup>[10]</sup>에 의해 제안된 수정 벽법칙(Modified Power-Law)유체 모델이 그중 아주 적합한 모델이다.



[그림 1] Shear-Thinning 유체의 전형적 유동 형태 개략도 [Fig. 1] Typical flow curve of a Shear-Thinning fluid

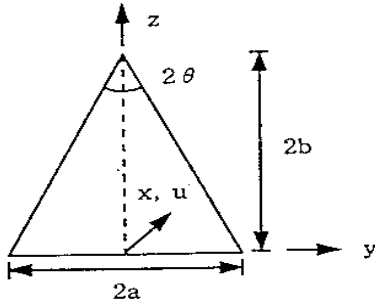
$$\eta_a = \frac{\eta_0}{1 + \frac{\eta_0}{K} (\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (1)$$

식(1)은 아주 작은 전단율 영역( $(\eta_0/K)(\dot{\gamma})^{1-n} \ll 1$ )에서 겔보기 점성계수가 뉴턴 유체의 점성계수와 같고, 아주 큰 전단율 영역( $(\eta_0/K)(\dot{\gamma})^{1-n} \gg 1$ )에서는 벽법칙 유체의 겔보기점성계수와 같게 된다. 수정벽법칙 모델의 그 이외의 장점은 다른 모델에 비하여 해석하는 동안에 뉴턴 유체와 벽법칙 유체의 레이놀즈수가 유지될 수 있다는 점이다.

본 연구의 목적은 삼각형 단면을 갖는 덕트 내의 완전히 발달된 층류유동에서의 유변학적 특성을 보여 주는 수정 벽법칙 유체를 활용한 덕트 및 열교환기 설계를 위한 기초 자료를 습득하고, 또한 압력강하 및 대류 열전달 계수를 유체의 전단율에 대한 점근적 관계(asymptote)를 수치해석으로 최초로 수행하여 상업용 열교환기 덕트 내의 열전달 촉진을 예측하여 대류에 의한 열전달률을 증가시키는 데에 목적이 있다.

## 2. 지배 방정식

삼각형 단면을 갖는 덕트 내의 비뉴톤 유체의 유동 조건은 유동이 층류, 정상 상태, 비압축성, 완전 발달이라고 가정되어야 한다. 또한 길보기 점도를 제외한 모든 유체의 물성치는 상수라고 가정한다. 삼각형 단면의 형상 및 좌표계는 그림 2에 보여 진다.



[그림 2] 삼각형 덕트의 개략도  
[Fig. 2] Schematic diagram of triangular duct

Shah 및 London[1]은 삼각형 단면을 갖는 덕트 내의 완전히 발달된 뉴톤 유체의 층류유동에 대하여 다음과 같이 마찰계수에 대한 해를 얻었다.

$$f \cdot Re = \frac{12(B+2)(1 - \tan^2\theta)}{(B-2)[\tan\theta + (1 + \tan^2\theta)^{\frac{1}{2}}]^2}$$

$$B = \left[ 4 + \frac{5}{2} \left( \frac{1}{\tan^2\theta} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

삼각형 단면을 갖는 덕트내의 완전히 발달된 멱법칙 비뉴톤 유체의 층류유동에 대하여 Kozicki[5], Chang[11]은 다음과 같이 속도분포와 레이놀즈수에 대한 해를 얻었다.

$$f \cdot Re_g = 2^{3n+3} \left( \frac{C_1 + C_2 n}{n} \right)^n \quad (3)$$

꼭지점의 각도(2θ)에 따르는 계수 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 표 1과 같다.

수정멱법칙 비뉴톤 유체의 경우 길보기 점성계수는 다음과 같다.

[표 1] 삼각형 덕트에 대한 무차원 Kozicki 계수<sup>[5,6]</sup>  
[Table 1] Dimensionless Kozicki coefficients<sup>[5,6]</sup> for isosceles ducts

Triangle apex angle (2θ)	C1	C2
10°	0.1547	0.6278
20°	0.1693	0.6332
40°	0.1840	0.6422
60°	0.1875	0.6462
80°	0.1849	0.6438
90°	0.1830	0.6395

$$\eta_{a,y} = \frac{\eta_0}{1 + \frac{\eta_0}{K} \left( \frac{du}{dy} \right)^{1-n}}$$

$$\eta_{a,z} = \frac{\eta_0}{1 + \frac{\eta_0}{K} \left( \frac{du}{dz} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

Shear-Thinning 비뉴톤 유체로 분류되는 수정멱법칙 유체의 경우 그림 2의 좌표계에서 삼각형 단면을 갖는 덕트 내의 완전히 발달된 수정 멱법칙 비뉴톤 유체의 층류 유동에서의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\bar{u} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} u \, dA_c \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_{a,y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_{a,z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$u(y, -\cot\theta \cdot y + \frac{y}{\tan\theta}) = 0$$

$$u(y, 0) = 0, \quad \frac{\partial u(0, z)}{\partial y} = 0$$

지배 방정식을 무차원화하기 위한 파라메타를 고려하면,

$$y^+ = \frac{y}{d_h}, \quad z^+ = \frac{z}{d_h}$$

$$d_h = \frac{2a \cdot \cos\theta}{1 + \sin\theta}$$

$$\eta^+ = \frac{\eta_a}{\eta^*}, \quad u^+ = \frac{u}{u} a$$

$$\eta^* = \frac{\eta_0}{1 + \frac{\eta_0}{K} \left(\frac{\bar{u}}{d_h}\right)^{1-n}}$$

$$\beta = \frac{Re_g}{Re_{d_h}} = \frac{\eta_0}{K} \left(\frac{\bar{u}}{d_h}\right)^{1-n}$$

$$\eta^+ = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \left(\frac{du^+}{dy^+}\right)^{1-n}} a,y$$

$$\eta^+ = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \left(\frac{du^+}{dz^+}\right)^{1-n}} a,z \quad (7)$$

$$u^{++} = \frac{u^+}{\frac{f \cdot Re_M}{2}} \quad (8)$$

$$Re_M = Re_{d_h} + Re_g = \frac{\rho \bar{u} d_h}{\eta_0} + \frac{\rho \bar{u}^{2-n} d_h^n}{K} \\ = \frac{\rho \bar{u} d_h}{\eta_0} (1 + \beta) \quad (9)$$

$$\eta^+ = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \left(\frac{1}{2} f \cdot Re_M\right)^{1-n} \left(\frac{du^{++}}{dy^+}\right)^{1-n}} a,y$$

$$n_{a,z}^+ = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \left(\frac{1}{2} f \cdot Re_M\right)^{1-n} \left(\frac{du^{++}}{dz^+}\right)^{1-n}}$$

식 (1)과 (9)로부터

$$\beta \rightarrow 0 \text{ 이면 } n_a \rightarrow n_0, \quad Re_M \rightarrow Re_{d_h}$$

$$\beta \rightarrow \infty \text{ 이면 } n_a \rightarrow K (\dot{\gamma})^{n-1}, \quad Re_M \rightarrow Re_g$$

임을 알 수 있다.

무차원 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$f \cdot Re_M = \frac{1}{4} \frac{(1 + \sin\theta)^2}{\sin\theta \cdot \cos\theta} \frac{1}{\int_0^{2b^+} \int_0^{a^+} u^{++} dy^+ dz^+} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial y^+} \left( \eta_{a,y}^+ \frac{\partial u^{++}}{\partial y^+} \right) + \frac{\partial}{\partial z^+} \left( \eta_{a,z}^+ \frac{\partial u^{++}}{\partial z^+} \right) = -1 \quad (11)$$

무차원 경계조건은 다음과 같다.

$$u^{++}(y^+, -\cot\theta \cdot y^+ + \frac{y^+}{\tan\theta}) = 0$$

$$u^{++}(y^+, 0) = 0, \quad \frac{\partial u^{++}(0, z^+)}{\partial y^+} = 0$$

또한 점성 소산항과 내부 열 발생을 무시하고 열적으로 완전발달된 삼각형 단면 내에서의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{u}{a} \frac{dT_B}{dx}$$

여기서 무차원 변수를 도입하면

$$T^+ = \frac{T - T_w}{T_B - T_w}, \quad T^{++} = \frac{T^+}{N_H}$$

위의 에너지 방정식을 무차원 변수를 이용하여 무차원화하면 다음과 표시된다.

$$\frac{\partial^2 T^{++}}{\partial y^{+2}} + \frac{\partial^2 T^{++}}{\partial z^{+2}} = -4 u^+$$

무차원 경계조건은 다음과 같다.

$$T^+(y^+, z^+) = 0 \quad (\text{덕트 벽 조건}) \quad (\text{CHF, H})$$

혼합 평균온도(bulk temperature, TB) 정의를 고려하면

$$T_B = \frac{\int_{A_c} u T dA_c}{A_c u} \quad (12)$$

삼각형 단면 덕트에 대한 식(12)는 다음과 같이 무차원식으로 표시된다.

$$1 = \frac{1}{\int_{A^+} u^+ T^+ dA^+} \quad (13)$$

$T^{++}$ 의 개념을 도입하고 뉴셀트 수( $Nu_H$ )에 대하여 해석하면 다음과 같다.

$$Nu_H = \frac{1}{\int_{A^+} u^+ T^{++} dA^+} \quad (14)$$

위의 식(11)에서 해석한 속도 해( $u^+$ )와 함께 열 경계조건(CHF)에 대하여 전단율 파라미터( $\beta$ )에 대한 뉴셀트 수를 식(14)로부터 축차 가속 완화법(successive over-relaxation)를 활용한 Alternating Direction Implicit (ADI)방법을 사용하여 수치적으로 계산할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

기존 비뉴턴 유체의 경우 오직 멱법칙 유체모델을 이용하여 뉴턴 영역 및 멱법칙 영역만의 해석결과를 이용하여 압력강하 및 대류 열전달률을 예측하였지만 본 연구에서는 비뉴턴 유체의 점성계수 구성방정식중 수정 멱법칙 유체 모델을 이용하여 삼각형의 단면을 갖는 덕트 내의 완전히 발달된 수정멱법칙 유체의 층류유동에 대하여 Shear-Thinning 유체의 뉴턴 영역부터 천이영역을 지나 비뉴턴 멱법칙 영역까지의 넓은 전단율 영역에서의 마찰계수와 수정 레이놀즈 수의 곱( $fRe_M$ ) 및 뉴셀트 수의 해석결과를 수치적으로 수행하였다. 이 해석 결과는 그림 3 및 그림 4에 나타내었다.

삼각형 단면 덕트에 대한 식(2)의 수치해는 그림3에 표시되었다. 이 그림은 전단율 파라미터( $\beta$ )가 다음에 언급되는 것처럼 세 영역으로 정의될 수 있다. 유체 유동의 전단율의 영역을 대표하는 계수인 전단율 파라미터( $\beta$ )는 천이 영역은 근사적으로  $10^{-3.0} \leq \beta \leq 10^{3.0}$  을 대표하고 완전 발달된 뉴턴 유체의 유동은  $\beta \leq 10^{-3.0}$  에 위치하며 완전히 발달된 멱법칙 비뉴턴 유체의 유동은  $\beta \geq 10^{3.0}$  에 위치한다. 따라서 전단율 파라미터( $\beta$ )는 삼각형 단면 덕트 내에서의 Shear-Thinning 유체 유동이 뉴턴 유체영역, 천이 영역, 또는 멱법칙 비뉴턴 유체 영역 중 어떤 영역에서 작용하는지를 알려주는 중요한 변수가 될 수 있다.

그림 3은 삼각형 단면 덕트 내에서의 Shear-Thinning 유체의 전단율 파라미터( $\beta$ )에 대한 압력 강하의 변화( $fRe_M$ )를 보여주고 있으며 수정 멱법칙 유체 유동의 중요한 특성들을 보여주고 있다. 레이놀즈 수는 전단율 파라미터( $\beta$ )에 대해 증가하는 추이를 보여주고 있다. 멱법칙 유동 지수( $n$ )가 증가할 때 낮은 레이놀즈 수 영역에서 뉴턴 유체 유동의 특성에 근접하는 추이를 보여주고 있다.

멱법칙 유동지수( $n$ )가 감소할 때는 높은 레이놀즈 수 영역에서는 멱법칙 유체 유동의 특성을 보여준다.

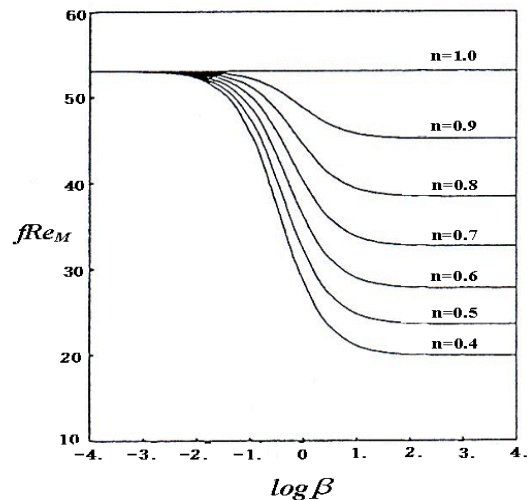
삼각형 단면 덕트 내에서 일반적인 뉴턴 유체보다는 Shear-Thinning 유체의 멱법칙 영역에서 압력 강하가 최대 62% 정도가 감소하였고 유체의 전단율이 증가할수록 압력 강하가 감소함을 확인하였고 멱법칙 유동지수( $n$ )가 작을수록 압력 강하가 감소함도 알 수 있었다.

표 2와 그림 3은 삼각형 단면 덕트 내에서 꼭지점 반각이 60°인 경우 멱법칙 유동지수( $n$ )에 따라서 전단율 파라미터( $\beta$ )에 대한 유동의 마찰계수와 수정 레이놀즈 수의 곱( $fRe_M$ )를 보여주고 있다.

[표 2] 60° 꼭지점 반각 삼각형 덕트의  $f \cdot Re_M$  값

[Table 2] Data of dimensionless pressure drop ( $f \cdot Re_M$ ) with 60 degrees of isosceles apex

$\log \beta$ \ $n$	- 4.0	- 3.0	- 2.0	- 1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0
1.0	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39
0.9	53.39	53.37	53.21	52.29	49.07	46.06	45.52	45.46	45.45
0.8	53.38	53.36	53.16	51.62	44.92	39.81	38.83	38.72	38.71
0.7	53.38	53.35	53.02	49.42	39.62	33.14	33.09	32.98	32.87
0.6	53.38	53.33	52.78	49.16	36.56	29.16	28.06	27.94	27.93
0.5	53.38	53.32	52.74	47.63	32.54	24.84	23.75	23.63	23.62
0.4	53.38	53.32	52.51	46.24	29.05	21.24	20.11	19.94	19.92



[그림 3] 60° 꼭지점 반각 삼각형 덕트의 shear-thinning 유체의 전단율 파라미터에 대한  $fRe_M$  값의 변화

[Fig.3] Product of friction factor and Reynolds number ( $f \cdot Re_M$ ) vs. shear rate parameter ( $\beta$ ) for shear-thinning fluids in an isosceles triangular duct with 60 degrees of isosceles apex

뉴턴 유체영역에 대한 여러가지 꼭지점 각( $2\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ )에 대하여 Shah 및 London<sup>1</sup>의 계산치와 뉴턴 유체 영역의 전단을 파라메타( $10^{3.0}$ )의 경우에 대한  $f \cdot Re_{dh}$  결과를 표 3에 나타내었는데 두 값들이 0.13 %이하의 차이를 보여주었고 Kozicki<sup>5</sup>의 계산결과와 멱법칙 비뉴턴 유체 영역의 전단을 파라메타( $10^{3.0}$ )의 경우의 다양한 멱법칙 유동지수(n) (n=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 1.0)를 가진 멱법칙 유체에 대한  $f \cdot Re_g$  결과를 표 4에 나타내었는데 두 값들이 2.85 %이하의 차이를 보여주었다.

[표 3] 뉴턴 유체의  $f \cdot Re_{dh}$  값의 현재값과 문헌치의 비교

[Table 3] Present and previous data of  $f \cdot Re_{dh}$  for

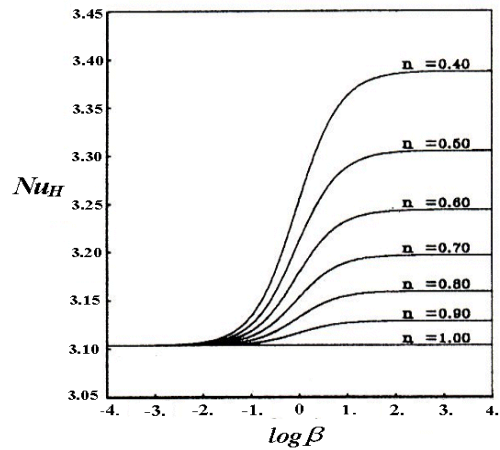
Newtonian fluid

$2\theta$	$f \cdot Re_{dh}$ (previous)[1]	$f \cdot Re_{dh}$ (present)
0°	48.000	48.000
10°	49.896	49.925
20°	51.288	51.354
30°	52.260	52.317
40°	52.888	52.948
50°	53.228	53.292
60°	53.332	53.391
70°	53.244	53.298
80°	52.992	53.047
90°	52.612	52.669
120°	50.976	51.016
150°	48.904	48.953
180°	48.000	48.000

[표 4] 60° 꼭지점 반각 삼각형 덕트의 멱법칙 유체의  $f \cdot Re_g$  값의 현재값과 문헌치의 비교

[Table 4] Present and previous data  $f \cdot Re_g$  for power law fluid with 60 degrees of isosceles apex

n	$f \cdot Re_g$ (previous)[5,6]	$f \cdot Re_g$ (present)
0.4	19.197	19.921
0.5	22.866	23.624
0.6	27.161	27.935
0.7	32.206	32.873
0.8	38.140	38.716
0.9	45.126	45.452
1.0	53.357	53.391



[그림 4] 60° 꼭지점 반각 삼각형 덕트의 shear-thinning 유체의 전단을 파라메타에 대한 뉴셀트 수의 변화 ((CHF, H))

[Fig.4] Nusselt number (CHF, H) vs. shear rate parameter ( $\beta$ ) for shear-thinning fluids in an isosceles triangular duct with 60 degrees of isosceles apex

그림 4는 꼭지점 각( $2\theta$ )이 60°인 삼각형 단면 덕트 내에서의 완전발달된 유동에 대해 일정 열유속 열 경계조건(CHF, H)을 가진 Shear-Thinning 유체의 전단을 파라미터( $\beta$ )에 대한 무차원 대류열전달 계수인 뉴셀트 수의 변화를 정량적으로 보여주고 있다. 이 그림에 의하면 전단을 파라미터( $\beta$ )가  $10^{-2.5}$  영역이하의 뉴턴 유체 영역에서는 거의 대류 열전달 향상이 존재하지 않으나  $10^{-2.5}$  영역 이상에서는 전단을 파라미터( $\beta$ )가 커질수록 서서히 열전달 향상이 발생하기 시작하여 멱법칙 유체 영역 ( $\beta \geq 10^{3.0}$ )에서 약 12% 정도의 뉴셀트 수의 증가를 알 수 있어 멱법칙 비뉴턴 유체 영역에서 최대의 대류 열전달 촉진이 발생함을 확인할 수 있었다.

위의 결과로 판단해 볼 때 삼각형 단면 덕트를 이용한 열교환기 설계에 있어서 대류 열전달율의 촉진은 Shear-Thinning 유체의 속도 구배 성분에 근거한 전단의 크기에 따라 존재함을 확인한 매우 의미있는 해석 결과라고 예측할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

삼각형 단면 덕트 내에서의 완전발달된 Shear-Thinning 유체 유동에 대하여 예전의 멱법칙 구성방정식을 이용한 해석결과와는 달리 점성계수 구성방정식인 수정 멱법칙 유체 모델을 이용하여 전단을 파라미터( $\beta$ )에 대한 유동의 마찰계수와 수정 레이놀즈 수의 곱( $f \cdot Re_M$ ) 과

뉴셀트 수의 해석결과를 처음으로 수치적으로 수행하였다. 수정 멱법칙 유체 모델을 이용한 수치적인 해는 덕트 및 열교환기 내에서 열전달 촉진을 극대화하기 위하여 유체의 전단율의 영향을 고려하여 설계해야 함을 확인할 수 있었다.

수정멱법칙 유체를 적용할 경우 뉴턴 유체보다는 Shear-Thinning 유체의 멱법칙 영역에서 압력강하가 최대로 감소하였고 유체의 전단율이 증가할수록 압력강하가 감소함을 확인하였고 멱법칙 유동지수(n)가 작을수록 압력강하가 감소함도 알 수 있었다.

또한 전단율이 증가하면 멱법칙유체의 특성을 가지려는 경향이 강하고 전단율이 감소하여 아주 작은 값을 갖게되면 뉴턴 유체의 특성을 가지려는 경향이 강한 것을 알 수 있었다.

삼각형 단면 덕트 내에서의 완전발달된 유동에 대해 일정 열유속 열 경계조건(CHF)을 가진 Shear-Thinning 유체의 전단율 파라미터( $\beta$ )에 대한 뉴셀트 수의 변화를 해석한 결과에 의하면 뉴턴 유체 영역에서는 거의 대류에 의한 열전달 촉진이 거의 발생하지 않으나 멱법칙 유체 영역에서 최대의 뉴셀트 수의 증가에 의한 최대의 대류 열전달 촉진이 발생하였다. 그러므로 삼각형 단면 덕트를 이용한 덕트 및 열교환기 설계에 있어서 압력손실 감소 및 열전달 촉진을 위하여 비뉴턴 Shear-Thinning 유체의 사용이 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

### References

[1] Shah, R. K. and London, A. L., "Laminar Flow Forced Convection in ducts, Supplement 1 to Advances in Heat Transfer, pp. 227~231. (T. F. Irvine, Jr, and J. P. Hartnett, ed.)", Academic Press, New York, 1978.

[2] Sparrow, E. M., "Laminar Flow in Isosceles Triangular ducts", AIChE J., Vol. 8, pp. 599~605, 1962.

[3] Migay, V. K., "Hydraulic Resistance of Triangular Channels in Laminar Flow", Energy, Vol. 6, No. 5, pp. 122~130, 1963.

[4] Eckert, E. R. G. and Irvine, T. F. Jr, "Pressure Drop and Heat Transfer in a duct with Triangular Cross Section", J. Heat Transfer, Vol. 82, pp. 125~132, 1960.

[5] Kozicki, W. C., Chou, H. and Tiu, C. "Non-Newtonian Flow in ducts of Arbitrary Cross-Sectional Shape", Chemical Engineering Science, Vol. 21, pp.

665~669, 1966.

[6] J. A. Cheng, "Laminar Forced Convective Heat Transfer of Power Law Fluids in Isosceles ducts with Peripheral Wall Condition", Ph.D. Thesis, Mechanical Eng.Dept., State Univ. of New York, 1985.

[7] Sutterby, J. L. "Laminar Converging Flow of Dilute Polymer Solution in Conical Section-I. Viscosity Data, New Viscosity Model, Tube Flow Solution", AIChE J., Vol. 12, pp. 63~77, 1966.

[8] Cross, M. M., "Rheology of Non-Newtonian Fluids: A New Equation for Pseudoplastic Systems", J. Colloid. Sci., Vol. 20, pp. 417~428, 1965.

[9] Carreau, P. J., "Rheological Equations from Molecular Network Theory", Tran.Soc.Rheol., Vol. 16, pp. 99~110, 1972.

[10] Dunleavy, J. E. and Middleman, S., "Relation of Shear Behavior of Solution of Polyisobutylene", Tran.Soc.Rheol., Vol. 10, pp. 151~164, 1966.

[11] Chang, J. A. "Laminar Forced Convective Heat Transfer of Power Law Fluids in Isosceles ducts with Peripheral Wall Condition", Ph.D. Thesis, Mechanical Eng.Dept., State Univ. of New York, 1985.

이 동 렬(Dong-Ryul Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학학사)
- 1995년 5월 : 뉴욕주립대학교 (스토니부룩)대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 5월 ~ 1995년 12월 : 뉴욕주립대학교(스토니부룩) 대학원 기계공학과 박사후 연구원

- 1995년 12월 ~ 1997년 3월 : 삼성자동차 기술연구소 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교기계자동차공학부 교수

<관심분야>

열전달, 유변학, 열음향