

< 논 문 >

## 전단율에 의존적인 비뉴턴 유체의 열전도율이 열전달 향상에 미치는 영향

신세현\* · 이성혁\* · 손창현\*

(1995년 11월 13일 접수)

### The Effect of the Shear-Rate Dependent Thermal Conductivity of Non-Newtonian Fluids on the Heat Transfer Enhancement

S. Shin, S. H. Lee and C. H. Sohn

**Key Words :** Shear Rate-Dependence(전단율 의존성), Thermal Conductivity(열전도율), Non-Newtonian Fluid(비뉴턴 유체), Heat Transfer Enhancement(열전달 향상)

#### Abstract

The present study investigates the effect of the shear rate-dependent thermal conductivity of non-Newtonian fluids on the heat transfer enhancement in a pipe flow. An axially-constant heat flux boundary condition was adopted in the thermally fully developed region. The present analytical results of Nusselt numbers for various non-Newtonian fluids show heat transfer enhancement over those of a shear rate-independent thermal conductivity fluids. The present analytical results showed good agreement with the previous experiments which excluded the temperature-dependent viscosity effect on heat transfer. This study also proposes the use of a shear rate-dependent thermal conductivity fluids in the design of a heat exchanger for heat transfer enhancement as well as reduction of fouling.

#### 기 호 설 명

$C$  : 비열  
 $D$  : 덕트 지름  
 $f$  : 마찰계수  
 $K$  : 멱법칙 상수  
 $k$  : 열전도율  
 $n$  : 멱법칙 지수  
 $Nu$  : 누셀 수  
 $P$  : 압력  
 $q_w$  : 벽 열유속  
 $R$  : 덕트 반경  
 $r$  : 반경방향의 거리

$Re_K$  : 일반화된 레이놀즈 수

$T$  : 온도  
 $u$  : 속도  
 $x$  : 축방향 거리

#### 그리스문자

$\alpha$  : 각도  
 $\dot{\gamma}$  : 전단율  
 $\eta$  : 의사점도  
 $\theta$  : 무자원 온도  
 $\rho$  : 밀도  
 $\tau$  : 전단응력

#### 상첨자

+ : 무차원화

\*경북대학교 기계공학부

## 하첨자

0 : 정지유동장

B : 벌크

m : 평균

w : 벽

## 1. 서 론

기존의 다수 연구 보고에 의하면 불성치가 실제의 주변 환경과 조건이 고려되어야 열·유동의 해석에서 올바른 평가 및 예측을 할 수 있다고 지적하고 있다. 특히 온도장에 민감한 불성치들은 이러한 지적의 대상이 되어 온도 변화에 따른 불성치의 변화를 고려한 해석이 최근 다시 부각되었다. 점도가 전단율에 의존적인 것으로 알려진 비뉴턴 유체의 경우, 점도가 전단율의 함수일뿐 아니라, 온도에도 상당히 민감한 경우 이러한 온도 및 전단율의 변화에 따른 점도 영향이 조합되어 유동장 및 온도장의 계산에 고려하여야 한다고 보고하였다.<sup>(1)</sup>

한편, 비뉴턴 유체의 열전도율은 주변 환경에 따른 영향이 미약하여 거의 일정한 값으로 가정되어 왔으나 최근 연구 결과<sup>(2)</sup>에 따르면 비뉴턴 유체의 열전도율이 온도와 전단율에 따라 크게 변화하는 것을 보고한 바 있다. 기존의 유체에 대한 열전도율 측정은 전단율에 따른 영향이 배제된 정지유동장(stationary flow field) 하에서 이루어져, 이러한 정체-열전도율(stationary thermal conductivity,  $k_0$ )만을 고유 물성치로 사용하여 왔다. 따라서, 실제의 전단 유동장에 대한 온도장의 해석에서 전단율에 따른 가변적 열전도율이 고려되지 않고, 정체-열전도율만이 고려될 경우, 이로 인한 다소의 오차가 그 해석에 포함되게 된다.

이와 같이 비뉴턴 유체의 열전도율이 온도뿐 아니라 전단율에 따른 체계적인 측정이 이루어져야 하는데 이에 관한 연구는 그리 흔치 않은 실정이다. 대표적인 비뉴턴 유체의 하나인 점탄성 유체(viscoelastic fluid)의 경우, 전단율이 열전도율에 미치는 영향에 대해서는 기존의 연구가 미진할 뿐더러 기존의 연구 결과들이 상반되기도 한다.

Picot 등<sup>(3,4)</sup>은 Dow-200과 polyethylene melts에 대하여 전단율 및 온도 변화에 따른 열전도율을 측정하였다. Dow-200 유체의 경우, 비교적 낮은 전단율( $\dot{\gamma} < 300$ )의 범위에서 측정할 결과, 낮은 분자량(molecular weight)의 유체는 전단율에 대해 단

조 증가 함수를 보였고, 높은 분자량의 유체는 어느 정도 증가하여 최대치를 보인 후 감소하는 복잡한 현상을 보였다. 또한 폴리에틸렌 멜트의 경우에도, 전단율을 증가시키기에 따라 초기에는 증가하다가 임의의 전단율 이상에서는 다시 감소하는 추세를 보였다. 그러나 Wallace<sup>(5)</sup> 등은 열전도율이 전단율 뿐만 아니라 분자량에도 의존적인 것임을 밝혀 내고 고분자량의 폴리에틸렌 멜트의 경우에도 전단율을 증가시키기에 따라 초기에는 열전도율이 급격히 감소하여 임의의 전단율에서 초기치의 55%까지 도달후 다시 증가하는 현상을 보고하였다. 한편, 고분자수용액(polymer aqueous solution)의 경우에는 열전도율이 대체적으로 전단율의 단조증가함수로 보고되었고 이때 온도가 증가함에 따라, 농도가 감소됨에 따라 열전도율은 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>(2,5)</sup>

한편, 뉴턴 유체와 미립자가 혼합된 현탁액의 열전도율에 관한 연구는 다소 이루어져 있는 편이다. Ahuja<sup>(6,7)</sup>는 50~100  $\mu\text{m}$  크기의 polystyrene 입자가 액체에 중립적으로 부유 상태인 현탁액(suspension)을 이용하여, 층류 유동에서의 전단율에 따른 열전도율 변화를 측정하였다. 그러나 Ahuja의 측정 방법에서 전단율이 일정하지 않은 유동장에서의 열전도율 측정으로 신뢰도가 다소 떨어져 타 측정결과와 비교하기가 어렵다.

Sohn과 Chen<sup>(8,9)</sup>은 폴리에틸렌(polyethylene) 미립자를 이용한 현탁액으로 이중 원형 관내의 Couette 유동에서 열전도율을 측정하고, 이를 미립자 크기를 특성 길이로 하는 Peclet 수의 함수로 된 모델을 에너지 식에 삽입하여 온도장이 발달중인 구역과 잘 발달된 구역에 대해 각각 열전달계수를 구하였다. 그 결과, 전단율에 독립적인 열전도율( $k_0$ )과 전단율에 의존적인 벽-열전도율( $k_w$ )의 비에 따라 Nusselt 수는 최고 250%까지 향상되었다고 보고하였다. Charunyakorn 등<sup>(10)</sup>은 원형 덕트내의 마이크로 캡슐화(micro-encapsulation)된 상변화 물질의 슬러리(slurry) 유동장에서 전단율에 의해 증가되는 열전도율을 고려하여 열전달 특성에 대해 연구 보고하였다.

이와 같이 비뉴턴 유체 및 현탁액에 대하여, 전단율에 따른 열전도율의 측정이 다소 이루어져 이를 토대로한 열·유동에 대한 새로운 해석이 기대되고 있다. 즉, 전단율의 함수로 표현되는 열전도율이 에너지 지배방정식에 고려되어 온도장 해석이

다시 이루어져야 하며 이를 토대로 전단율에 의존적인 열전도율을 지닌 유체와 일정한 물성치를 가정한 유체와의 열전달계수를 비교할 필요성이 제기된다.

한편, 비뉴턴 유체의 열전도율에 대한 기본적인 연구는 미약하지만 어느 정도 이루어진 것에 비해 이를 이용한 열전달 특성에 관한 연구는 극히 드문 형편이다. 최근 Lee<sup>(2)</sup>는 실험적으로 얻은 전단율에 의존적인 열전도율을 고려하여 평행관내의 비뉴턴 유체 유동에 대한 열전달 특성을 해석적으로 연구하였다. 본 논문의 목적은 가장 일반적인 유동 현상인 원형덕트 내의 비뉴턴 유체 유동에서 전단율에 의존적인 열전도율이 열전달 향상에 미치는 영향에 관하여 해석적으로 연구하고 이에 관해 더 연구해야 할 과제를 제시하고자 한다.

## 2. 모델 및 지배방정식

Fig. 1은 본 연구의 문제를 묘사한 개략도이다. 유체는 완전히 발달된 속도 분포를 갖고 일정한 열유속을 받으며 원형 덕트로 유입된다. 본 연구는 HI 열경계 조건을 채택하여 축방향으로 균일한 열유속과 동시에 원주방향으로는 일정한 온도분포를 갖는다. 비뉴턴 유체의 유동장 및 온도장을 해석하기 위해서는 유동과 열에 관련된 물성치들의 상호관계 및 그 영향을 알고 있어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 가정들을 통해 지배방정식을 단순화하고자 한다.

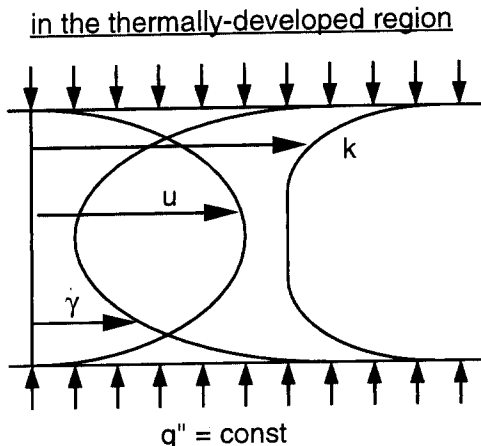


Fig. 1 Hydrodynamic and thermal boundary conditions

1. 유체의 물성치들은 일정하나 점도와 열전도율은 전단율의 함수이다.

2. 유체내의 축방향 열전도는 비교적 큰 Peclet 수의 유동조건하에 무시할 정도로 적다.

3. 점성일손실(viscous dissipation)은 작은 Brinkman 수의 조건하에 무시할 정도로 작다.

이러한 가정하에 운동량 및 에너지 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} [r\eta(\dot{\gamma}) \frac{du}{dr}] = \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} [rk(\dot{\gamma}) \frac{dT}{dr}] = \rho C u \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

운동량 방정식에서, 비뉴턴 유체의 점도( $\eta$ )는 전단율의 함수이고 전단율은 반경방향의 위치에 따라 변화하므로 이를 신중히 고려하여야 한다. 점도에 대한 여러 가지의 모델 중 가장 간단한 멱법칙(power-law) 모델을 다음과 같이 도입한다.

$$\tau_w = -\eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 멱법칙 상수이고  $n$ 은 멱법칙 지수로서 특히  $n$ 이 1인 경우에는 뉴턴 유체가 됨을 알 수 있다. 또한 전단율에 의존적인 열전도율에 대한 모델은 크게 두 가지로 대별되는데 하나는 전단율에 대한 단조증가 함수로된 것<sup>(2)</sup>이고 두번째는 Peclet 수에 대한 멱법칙 모델<sup>(9)</sup>이다. 후자는 온도장이 발달되는 구간에서 유용하게 사용될 수 있는 반면에 전자는 온도장이 완전히 발달된 구간에서 간단한 형태의 모델로 가변적 열전도율이 고려된 온도장을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단조증가 함수 형태의 모델을 다음과 같은 식으로 나타내고 이를 Fig. 2에 도시하였다.

$$k = k_0 + (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0) \tan \alpha \quad (5)$$

Fig. 2에서는 정지 유동장에서의 열전도율( $k_0$ )을 이용하여 무차원화된 열전도율의 변화를 전단율에 따라 나타내고 있다. 여기에서  $\dot{\gamma}_0$ 는 열전도율이 변화하기 시작하는 전단율의 값으로 이는 유체의 종류에 따라 다른데, 고분자 중합체의 농도가 큰 수용액의 경우에는 아주 낮은 전단율 값을 나타내고 있어 0으로 간주해도 무방하다. 그러나 농도가 낮은 수용액의 경우에는 어느 정도의 전단율까지의 변화에 일정한 열전도율 값을 유지하다가 그 이상의 전단율에서부터 증가하는 추이를 보여 이러한

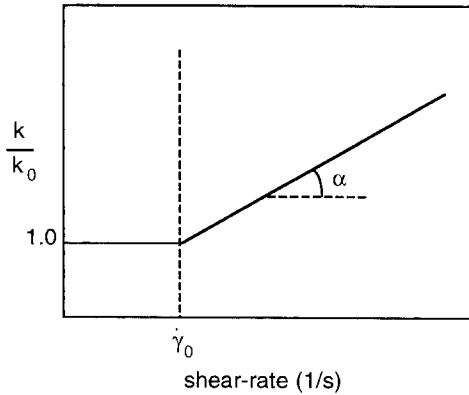


Fig. 2 Thermal conductivity v. s. shear-rate for non-Newtonian fluids

특성이 고려된 모델이 요구된다. 본 논문에서는 일정한 전단율  $\dot{\gamma}_0$  이하에서는 열전도율이 변화하지 않다가, 그 이상의 전단율에서는 선형 또는 비선형적으로 변화하는 2단계 형태를 나타내는 모델을 이용하였다. 그림 2는 이러한 모델을 도시한 것이다.

이 모델의 문제점은 전단율이 무한대로 증가할 때, 이에 따른 열전도율도 무한대 값을 갖게 되는데, 물리적으로는 어느 정도 증가하다가 점근적인 값에 도달할 것으로 예측된다. 그러나 이러한 점근적 접근의 추이를 보기 위해서는 높은 전단율의 범위에서 열전도율이 측정되어야 하는데 그 범위가 층류 유동 내에 존재하는지의 여부는 현재까지 알려져 있지 않은 실정이다.

한편, 지배방정식을 무차원화하기 위한 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$r^+ = \frac{r}{R}, \quad u^+ = \frac{u}{u_m}, \quad Re_g = \frac{\rho u_m^{2-n} D^n}{K}$$

여기서  $u_m$ 은 평균속도를 의미하며  $Re_g$ 는 비뉴턴 유체의 일반화된 (generalized) Reynolds 수를 나타낸다. 이를 이용하여 식 (1)을 무차원화하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{du^+}{dr^+} = -\frac{1}{2} \left( \frac{fRe_g}{2} \right)^{\frac{1}{n}} r^{+1/n} \quad (6)$$

이를 변수  $r^+$ 에 대해 적분하고 벽면에서의 경계 조건을 이용하여 적분상수를 구하여 정리하면 비뉴턴 유체의 유동장을 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$u^+ = \frac{n}{2(n+1)} \left( \frac{fRe_g}{2} \right)^{\frac{1}{n}} (1 - r^{+1+1/n}) \quad (7)$$

위 식을 무차원화하기 위해 몇 개의 매개변수를 추가하여 다음과 같이 정의한다.

$$u_m^+ = u_m / (k_0 R / \tan \alpha) \quad (8)$$

$$\dot{\gamma}^+ = \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_{REF} = (k_0 / \tan \alpha) \dot{\gamma} \\ = 1/2 u_m^+ (fRe_g/2)^{1/n} r^{+1/n} \quad (9)$$

$$\dot{\gamma}^+ = r_0 / (u_m / R) = (k_0 / \tan \alpha) \dot{\gamma}_0 \\ = 1/2 u_{m0}^+ (fRe_g/2)^{1/n} r^{+1/n} \quad (10)$$

$$\dot{\gamma}^+ - \dot{\gamma}_0^+ = 1/2 (u_m^+ - u_{m0}^+) (fRe_g/2)^{1/n} \quad (11)$$

$$k^+ = k/k_0 = 1 + (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0) \tan \alpha / k_0 \\ = 1 + (\dot{\gamma}^+ - \dot{\gamma}_0^+) \quad (12)$$

온도장이 충분히 발달된 구역에 대해서 균일한 열유속의 열부하를 받을 때, 축방향의 유체온도분포는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT_B}{dx} = \frac{2q_w}{R\rho u_m c} \quad (13)$$

여기서  $T_B$ 는 유체 평균온도 (bulk mean temperature)이다. 이를 이용하여 에너지방정식을 무차원화하고 정리하면 다음과 같은 상미분 방정식을 갖게 된다.

$$\frac{1}{r^+} \frac{d}{dr^+} [k^+ r^+ \frac{d\Theta}{dr^+}] = -u^+ \quad (14)$$

이때 편의상  $\Theta/N = \Theta^+$ 로 정의하면 지배방정식과 열경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r^+} \frac{d}{dr^+} [(1 + \frac{1}{2} \Delta u_m^+ (\frac{fRe_g}{2})^{1/n} r^{+1/n}) r^+ \frac{d\Theta^+}{dr^+}] \\ = -u^+ \quad (15)$$

$$r^+ = 0 \text{에서} : d\Theta^+ / dr^+ = 0 \quad (16)$$

$$r^+ = 1 \text{에서} : \Theta^+ = 0 \quad (17)$$

여기서  $\Theta$ 는  $(T_w - T) / (T_w - T_B)$ 로 정의된다. 주어진 열경계 조건을 이용하여 무차원화된 에너지방정식 (15)를 두 번 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\Theta^+ = -C_1 \int \left[ \left( \frac{1}{2} r^{+1/n} - \frac{n}{3n} \right) \right. \\ \left. + 1 \right] (r^+)^{2+1/n} / (1 + C_2 (r^+)^{1/n}) dr^+ \quad (18)$$

여기서  $C_1 = \frac{-n}{2(1+n)} (fRe_g/2)^{1/n}$ 이고,

$$C_2 = \frac{1}{2} u_m (fRe_g/2)^{1/n} \text{이다.}$$

### 3. 결 과

#### 3.1 변수 선정 및 해석

해석적인 해를 구하기 위해 지배방정식을 정리하

는 과정에서 지정되거나 선정되는 변수가 있는데, 여기에서는 비뉴턴 유체의 멱법칙 지수(power-law index)인  $n$ 과, 무차원화된 속도차  $\Delta u_m^*$ 이 있다. 멱법칙 지수  $n$ 은 유동조건의 변수라기 보다는 유체의 종류에 해당하는 변수이고, 일정한 유체의 유동조건을 좌우하는 변수로는  $\Delta u_m^*$ 이 남게 되는데, 이를 변수로 하는 해석적 해(analytical solution)를 이해하기 위해서는 변수  $\Delta u_m^*$ 에 대한 좀더 분명한 이해가 선행될 필요가 있다.

변수  $\Delta u_m^*$ 는 앞서 정의된 식 (8)에 의하면 공간적 평균화된(space-averaged) 유동의 평균유속  $u_m$ 이 정지유체의 열전도율  $k_0$ 와 반경  $R$ 에서 전단율에 따른 열전도율 변화의 기울기( $\tan \alpha$ )의 비로 나누어진 것이다. 한편, 비뉴턴 유체가 원형 관내의 유동에서 벽면 근처에서의 전단율은 멱법칙 모델에서 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{8u_m}{D} \quad (19)$$

위에서 정의된 벽전단율을 이용하여 변수  $\Delta u_m^*$ 를 분석해 보면,  $u_m/R$ 을  $\dot{\gamma}_w$ 으로 치환하고  $\tan \alpha$ 를 앞서 정의된 식 (8)로부터  $\Delta k/\Delta \dot{\gamma}$ 으로 치환하여 이를 다시 정리하면,

$$\Delta u_m^* = \frac{n}{(3n+1)} \frac{\dot{\gamma}_w}{k_0} \frac{\Delta k}{\Delta \dot{\gamma}} \quad (20)$$

과 같이 되는데, 이때  $n$ 과  $k_0$ 는 한 유체에 대해서 상수와 같은 물성치에 해당한다. 그 나머지 항들에 대해 살펴보면, 유동장내 전단율 분포에서 유효 전단율(effective shear rate)의 최대차는  $\Delta \dot{\gamma}$ 에 따른 열전도율 변화량의 비( $\Delta k/\Delta \dot{\gamma}$ )와 벽전단율( $\dot{\gamma}_w$ )과의 곱으로 변수  $\Delta u_m^*$ 을 대신하고 있다. 여기에서 유효전단율의 최대차는 벽전단율과 영전단율( $\dot{\gamma}_0$ )의

차이로 정의된다.  $\Delta \dot{\gamma}$ 에 따른 열전도율의 변화율( $\Delta k/\Delta \dot{\gamma}$ )은 유체의 열전도율이 전단율에 얼마만큼 의존적인가를 표시하는 항으로서 그 값은 Fig. 2의 기울기에 해당하는  $\tan \alpha$ 의 값과 동일하다. 여기에서, 그 기울기가 크면 클수록 전단율에 대한 열전도율의 의존성이 큰 것이 되고, 의존성이 크면 클수록 열전도율은 벽 근처에서 크게 증가하게 된다. 따라서  $\tan \alpha$  또는  $\Delta k/\Delta \dot{\gamma}$ 로 표시되는 열전도율의 전단율 의존도와 벽전단율은 본 연구의 중요한 매개변수들로서 이 두 개의 매개변수가 하나로 조합된 복합변수  $\Delta u_m^*$ 으로 대신하여 본 연구에서 사용하고자 한다.

### 3.2 결과 및 토의

위에서 얻은 최종 식을 상용 소프트웨어 중 하나인 mathematica를 이용하여 적분한 후, 여러 가지의 변수를 대입하여 해를 구하고 이를 Table 1에 간략히 정리하였다. 먼저, 결과에 대해서 분석하기 전에 위에서 얻은 값을 검증하기 위하여 뉴턴 유체에 해당하는 멱법칙 지수  $n$ 을 1로 대입하고 전단율에 따른 열전도율의 변화가 거의 없는 유동조건으로서 매우 작은  $\Delta u_m^*$ 을 대입하여 이를 기존의 잘 알려진 뉴턴 유체의 Nusselt 수와 비교한 결과, 잘 일치함을 확인하였다.

또한 멱법칙 지수  $n$ 을 변화시키면서 비뉴턴 유체의 열전도율이 전단율에 무관한 경우의 Nusselt 수를 각각의  $n$ 값에 대응하는 기존의 Nusselt 수와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 열전도율이 전단율에 무관한 비뉴턴 유체가 일정한 열유속을 받으며 원형 덕트를 흐를 때의 Nusselt 수는 다음과 같은 식으로 Bird<sup>(11)</sup>에 의해 구하여졌다.

**Table 1** Nusselt numbers for various non-Newtonian fluids in the thermally-developed region

$\Delta u_m^*$	Nu n=1	Nu n=0.787*	Nu n=0.5	Nu n=1/3	Nu n=1/4	Nu n=1/5
0.001	4.370	4.527	4.740	5.053	5.322	5.534
0.004	4.410	4.580	4.810	5.086	5.371	5.586
0.01	4.490	4.666	4.903	5.190	5.469	5.689
0.04	4.860	5.047	5.300	5.641	5.937	6.175
0.1	5.640	5.844	6.120	6.485	6.802	7.053

\* Aqueous solution of Separan AP-273, 1000 wppm

$$Nu = \frac{8(5n+1)(3n+1)}{(31n^2+12n+1)} \quad (21)$$

Fig. 3은 비뉴턴 유체의 멱법칙 지수  $n$ 이 0.5일 때, 열전도율이 전단율에 독립적인(shear rate-independent conductivity, SRIC) 유체의 경우, Nusselt 수는 4.746을 갖고 이는 위의 식 (21)에 의해 얻어진다. 열전도율이 전단율에 의존적인 경우(shear rate-dependent conductivity, SRDC)에는 변수  $\Delta u_m^+$ 가 매우 작을 때는 SRIC의 Nusselt 수와 거의 동일한 값을 보이나, 변수  $\Delta u_m^+$ 의 증가에 따라 Nusselt 수( $Nu_0 = hD/k_0$ )가 선형적으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 앞에서 언급한 변수  $\Delta u_m^+$ 의 해석을 이용하여 Fig. 3을 설명하면, 열전도율의 변화율 또는 유동장의 벽전단율의 크기가 Nusselt 수에 직접적으로 영향을 주어 증가시킨 것임을 알 수 있다.

Fig. 4는 여러 개의 멱법칙 지수  $n$ 에 대한 각각의 비뉴턴 유체에 대해서 Nusselt 수를 무차원화된 속도차  $\Delta u_m^+$ 에 대해서 도시하였다. 이미 잘 알려진 바와 같이 지수  $n$ 값이 작아짐에 따라 속도 분포가 변하면서 Nusselt 수는 증가하게 된다. 전단율에 의존적인 열전도율을 고려하여 구한 Nusselt 수( $Nu_0 = hD/k_0$ )는 앞서 도시한 바와 같이 열전도율의 전단율 의존도와 유동장내 전단율 크기의 복합 변수인  $\Delta u_m^+$ 에 대해 선형적으로 증가함을 보이고 있다.

한편, 벽 근처에서의 열전도율을 기준으로한 Nusselt 수( $Nu_w = hD/k_w$ )는 기존의 값보다 작은 값을 갖게 되는데, 그 이유는 벽 근처에서의 전단

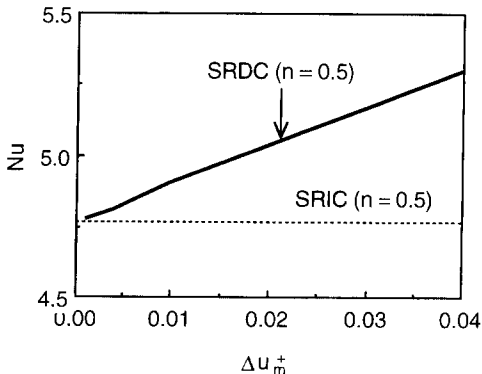


Fig. 3 Nusselt number v. s. dimensionless velocity difference for SRIC and SRDC non-Newtonian fluids

율이 유동장 내에서 가장 큰 값을 갖고 따라서 벽 근처의 열전도율( $k_w$ )이 전체 유동장의 평균 열전도율보다 큰 값을 갖기 때문이다. 일반적으로 온도장의 해석에서는 박막 온도(film temperature) 또는 평균 온도와 같은 특성 온도가 있어 온도장을 대표하는데, 전단 유동장에서 전단율에 의존적인 열전도율의 경우에는 이와같은 대표적 특성치에 대한 정의가 설정되지 않아 가변적 열전도율을 가진 유체의 열전달 해석에 있어서 어려움이 따르고 있다. 본 논문은 기존의 Nusselt 수와의 비교를 위해 정제 열전도율( $k_0$ )을 사용하는 것을 원칙으로 한다.

Fig. 5는 멱법칙을 이용하여 전단율에 의존적인 열전도율(SRDC) 유체에 대해 해석적 방법으로 구한 Nusselt 수를 기존의 실험 결과와 비교하기 위해서 점탄성유체인 Separan AP-273 수용액(1000

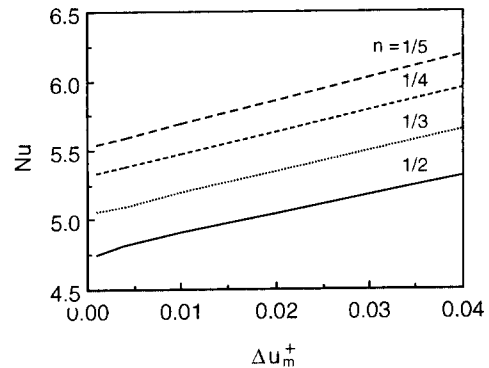


Fig. 4 Nusselt number v. s. dimensionless velocity difference for various SRDC non-Newtonian fluids

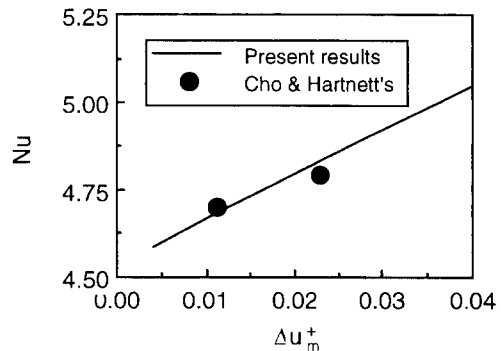


Fig. 5 Comparison of the present results with experiments

wppm)을 선택하였다. Lee<sup>(2)</sup>의 보고에 의하면 위 수용액은 전단율이 50 근처에서부터 증가하고 그 이하에서는 정지유동장에서의 측정된 열전도율과 동일한 값을 나타내어 앞서 예시한 Fig. 2의 모델과 잘 일치함을 보인다. 이는 유속 또는 레이놀즈 수가 어느 크기 이상에서만 가변 열전도율의 영향이 나타내게 되는 것이다. Cho와 Hartnett<sup>(12)</sup>은 위 유체에 대해 Re 수가 각각 212와 447의 범위( $\Delta u_m = 0.012 \sim 0.023$ )에서 유체평균온도와 벽면온도의 차( $\Delta T_{B-w}$ )가 상대적으로 작게 하여 실험한 결과, Gz 수가 30보다 작은 영역에서 Nu 수가 식 (21)에 비해 약 5-8% 정도 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 실험적 Nu 수의 증가는 온도에 의존적인 점도의 영향이 실험적으로 최소화되었기 때문에 논문이 고려한 가변 열전도율의 영향과 일치함을 Fig. 5에서 보이고 있다. 다수의 기존 실험 결과는 많지만  $\Delta T_{B-w}$ 가 상대적으로 커서 점도의 영향이 고려되어 있어 비교하기 어려운 점이 있다. 이를 위해 온도장이 충분히 발달된 영역과  $\Delta T_{B-w}$ 가 작은 실험을 하여 이를 보강하여 비교할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 최근 연구 보고된 비뉴턴 유체의 열전도율이 전단율에 의존적이라는 실험 결과를 토대로 이러한 특성이 원형 관내 유동에서의 열전달에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 비뉴턴 유체의 층류 유동장에서 전단율의 분포에 따른 열전도율의 변화와 더불어 특히 벽 근처에서의 전단율이 최대가 되고 따라서 유체의 열전도율도 벽 근처에서 크게 증가되어 결국 열전달 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 열전도율이 전단율에 의존적인 유체의 개발은 기존의 열전달 성능을 크게 개선시킬 수 있는 가능성을 제시하고 있어 열교환기 및 기타 냉각 모듈의 성능 향상에 큰 기대가 되고 있다. 이는 비뉴턴 유체에 국한되지 않고 전반적인 전단율에 의존적인 열전도율을 나타내는 이상 혼합물에 대해서도 재고해 볼 필요가 있다. 기존에 잘 설명되지 않은 미립자의 영향으로 발생하는 마이크로 대류현상<sup>(9)</sup>에 대해서도 미립자 효과가 배제되고 열전도율의 전단율 의존성만을 보이는 비뉴턴 유체와의 비교 연구를 통해 그 실체를 보다 합리적으로 접근해 갈 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Shin, S. and Cho, Y., 1994, "Laminar Heat Transfer in a Rectangular Duct with a Non-Newtonian Fluid with Temperature-Dependent Viscosity," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, Suppl. 1, pp. 19~30.
- (2) Lee, D. Y., 1995, "Thermal Conductivity Measurements of Non-Newtonian Fluids in a Shear Field," Ph. D. Thesis, SUNY at Stony Brook.
- (3) Chitrangad, B. and Picot, J. J. C., 1981, "Similarity in Orientation Effect on Thermal Conductivity and Flow Birefringence for Polymers-Polydimethylsiloxane," *Polymer Eng. Science*, Vol. 21, p. 782~789
- (4) Picot, J. J. C., Goobi, G. I. and Mawhinney, G. S., 1982, "Shear-induced Anisotropy in Thermal Conductivity of a Polyethylene Melts," *Polymer Eng. Science*, Vol. 32, pp. 154~157.
- (5) Wallace, D. J., Moreland, C. and Picot, J. J. C., 1985, "Shear Dependence of Thermal Conductivity in Polyethylene Melts," *Polymer Eng. Science*, Vol. 25, p. 70.
- (6) Ahuja, A. S., 1975, "Augmentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspension: Part 1," *J. Applied Physics* 46(8), pp. 3410~3416
- (7) Ahuja, A. S., 1975, "Augmentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspension: Part 2," *J. Applied Physics*, Vol. 46(8), pp. 3417~3425.
- (8) Sohn, C. W. and Chen, M. M., 1984, "Heat Transfer Enhancement in Laminar Slurry Pipe Flows with Power-Law Thermal Conductivities," *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 539~542.
- (9) Sohn, C. W. and Chen, M. M., 1981, "Microconvective Thermal Conductivity in Disperse Two-Phase Mixture as Observed in a Laminar Flow," *J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 47~51.
- (10) Charunyakorn, P., Sengupta, S. and Roy, S. K., 1991, "Forced Convection Heat Transfer in Microencapsulated Phase Change Material Slurries: Flow in Circular Ducts," *Int. J. Heat Mass*

- transfer*, Vol. 34, pp. 819~833.
- (11) Bird, R. B., Armstrong, R. C. and Hassager, O., 1977, "Dynamics of Polymeric Liquids," Vol. 1 Wiley, New York.
- (12) Cho, Y. and Hartnett, J. P., 1982, "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow", in *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 59~141.