

# 봉다발을 지나는 유동장에서 Prandtl 수가 난류 열전달에 미치는 영향

김 신\*

## Effect of Prandtl Number on Turbulent Heat Transfer in Flow Fields through Rod Bundles

Sin Kim\*

### ABSTRACT

The turbulent heat transfer in rod bundles which are commonly adopted in nuclear fuel bundles is analyzed with  $k-\epsilon$  2-equation model. For the precise prediction of the turbulent flow field, an anisotropic eddy viscosity model is used. When the analysis of the temperature field, the effects of various parameters such as geometry, Reynolds and Prandtl numbers are reflected. Especially, the calculation is made for Prandtl number from 0.01 to 10.0 in order to analyze the effect of Prandtl number of coolant on the heat transfer in rod bundles. The numerical results show that in small  $P/D$  geometries low Prandtl number makes severe changes of the surface temperature along rod surface. Because such severe temperature changes may cause damage to the fuel integrity, it is recommended that the Prandtl number effect on the rod surface temperature variation should be considered during the conceptual design of TR (Transmutation Reactor) in which liquid metal is expected to be used as a coolant.

**Key words** : Turbulent heat transfer, Rod bundle, Prandtl number,  
Liquid metal coolant

### 1. 서 론

비원형 단면을 갖는 유로로의 열전달은 여러

공학 분야에서 흔히 접하게 되는 문제이다. 이러한 비원형 유로를 지나는 난류 유동의 특징으로, 2차유동이나 강력한 비등방성 난류 확산과 같이 유동 단면에 횡방향 수송이 존재한다는 것과 모서리 부근에서는 층류 영역이 존재할 수 있다는 것을 들 수 있다.<sup>1,2)</sup> 만일 모서리에 인접한 고체

\* 제주대학교 에너지공학과  
Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

벽면이 충분히 가깝다면, 후자의 특징으로 인해 냉각재에 접하는 고체 벽면을 따라 열전달 계수는 상당히 변화할 수 있으며, 이는 벽면 온도의 심각한 변화를 초래할 수 있다. 그러나, 전자의 횡방향 수송 특성은 속도 및 온도 분포의 불균일성을 완화시키는 역할을 한다. 이상의 두 가지 요소의 상호 작용은 비원형 유로에서의 열유동장 특성을 예측하는데 상당한 어려움을 안겨준다.

본 연구에서는, 유동 영역으로 현재의 상업용 원자로 핵연료 집합체 설계에서 흔히 접하게 되는 봉다발 구조를 채택하였다. 봉다발 구조에서의 열유동장에 대한 지식은 정상 운전 조건에서는 핵연료 성능 해석에, 비정상 조건에서는 핵연료의 구조적 건전성을 보장하는데 필수적이다. 따라서, 봉다발 구조에 대한 열유동장 해석에 많은 연구가 있었으며 상당한 열수력 설계 경험이 축적되어 있는 것이 사실이다. 그러나, 상업용 원자로의 대부분을 차지하는 가압경수로(PWR : Pressurized Water Reactor)와 비등형경수로(BWR : Boiling Water Reactor)는 모두 냉각재로 물을 사용하고 있어 경험의 대부분은 물에 국한되어 있다. 이미 실증 실험로가 건설되어 있는 액체금속로(LMFBR : Liquid Metal Fast Breeder Reactors)의 경우에는 액체 나트륨을 냉각재로 채용하고 있는데, 이러한 액체 금속은 열전도도가 매우 높아 물의 경우와는 달리 전도에 의한 열전달이 상당한 중요성을 띠게 된다. 그리고, 열 경계층이 운동량 경계층에 비해 훨씬 더 두껍게 발달하므로 전반적인 열전달 거동은 물과는 상당히 다른 모습을 보인다. 또한, 최근 들어 사용후 핵연료와 같은 고준위 방사성 폐기물이 포함하고 있는 장수명 핵종의 소멸 처리를 위해 전환로(TR : Transmutation Reactor)에 대한 연구가 진행되고 있는데, 핵적 및 화학적 특성으로 인해 냉각재로 납, 납/창연(蒼鉛), 납/리튬 등이 거론되고 있다. 이 물질들은 나트륨의 경우와 마찬가지로 모두 금속으로, 이들을 작동 유체로 하는 유동에서의 열전달 거동에 대한 지식은 냉각재의 선정과 열수력 설계에 매우 중요

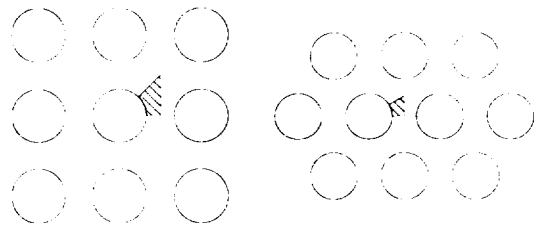
하다. 액체 금속 냉각재에 의한 열전달에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔으나 난류 유동장에 대한 정확한 해석을 바탕으로 하지 않고 있었으며,<sup>3)-5)</sup> 근래 상용 전산유체 코드를 이용한 해석이 시도되었으나 난류 모형의 제한으로 인해 그다지 만족스럽지 못한 실정이다.<sup>6)</sup>

따라서, 본 연구에서는 Kim-Park<sup>7)</sup>의 연구에서 개발된 사각 및 삼각 배열 봉다발 구조에서의 난류 유동장 해석 코드를 이용하여 봉다발 열유동장을 수치적으로 예측하고자 한다. 특히, 여러 작동유체의 물질적 특성이 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Prandtl 수를 0.01에서 10까지 변화시켜 가면서 난류 열전달을 해석하고자 한다.

## II. 수학적 모형

### (1) 지배 방정식

그림 1과 같이 무한히 배열된 맨 봉다발 구조에서의 난류 열유동장을 해석하기 위하여 난류 모형으로 난류 유동장 해석에 보편적으로 사용되는  $k-\epsilon$  2방정식 모형을 사용하였다. 유동 단면에서의 횡방향 수송을 정확히 모사하기 위하여 Kim-Park<sup>8)</sup>의 비등방성 난류 확산 모형을 채택하였다. 반면에, 비등방성 와류 확산과 마찬가지로 횡방향 수송에 기여하는 2차유동은 비등방성 와류 확산에 비해 그 영향이 매우 작으므로 무시하였다. 유동은 정상상태이며 축방향으로 완전히 발달되었다고 보았으며, 비압축성 유체를 가정하였다.



(a) Square array (b) Triangular array

Fig. 1 Schematic of rod bundle geometries

본 연구에서는 Prandtl 수를 비롯하여 Reynolds 수 및  $P/D$  등의 매개변수가 변화함에 따라 열전달 거동을 살펴보는 데 목적이 있으므로 지배 방정식을 무차원화하여 나타내기로 한다. 무차원화에 사용된 기저 변수로는 동점성 계수  $\nu$ 와 마찰속도  $u^*$ 를 사용하였다. 따라서 속도척도와 길이척도로  $u^*$ 와  $\nu/u^*$ 가 각각 채택되었다. 한편, 온도척도로는  $\nu/u^*(\partial T/\partial x_3)$ 를 사용하여 무차원화 하였다.

데카르트 텐서 표기법을 사용하여 본 연구에서 수행한 열유동장 해석에 대한 무차원화된 지배 방정식을 표현하면 아래와 같다. 단, 하첨자  $i$ 와  $j$ 는 1과 2의 값을 가질 수 있으며, 1, 2는 각각 벽면에 수직 및 수평한 방향을 나타낸다. 그리고, 상첨자 +는 변수가 무차원화 되었음을 나타낸다.

- 무차원화된 축방향 운동량 방정식

$$-\frac{\partial}{\partial x_i^-} \left[ (\delta_{ij} + \nu_{ij}^+) \frac{\partial U_3^+}{\partial x_j^+} \right] = -\frac{4}{Re^*} \quad (1)$$

$$Re^* = \frac{u^* D_H}{\nu} \quad (2)$$

- 무차원화된 난류 운동 에너지 방정식 ( $k^+$  방정식)

$$-\frac{\partial}{\partial x_i^-} \left[ (\delta_{ij} + \nu_{ij}^+ / \sigma_k) \frac{\partial k^+}{\partial x_j^+} \right] \quad (3)$$

$$= P_k^- - \epsilon^+ ,$$

$$P_k^+ = -\frac{u_1^+ u_3^+}{u_1^+ u_3^+} \frac{\partial U_3^-}{\partial x_1^+} \quad (4)$$

$$- \frac{u_2^+ u_3^+}{u_2^+ u_3^+} \frac{\partial U_3^+}{\partial x_2^+} .$$

여기에서  $\sigma_k = 1.0$

- 무차원화된 난류 운동 에너지 소산을 방정식 ( $\epsilon^+$  방정식)

$$-\frac{\partial}{\partial x_i^-} \left[ (\delta_{ij} + \nu_{ij}^+ / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon^+}{\partial x_j^+} \right] \quad (5)$$

$$= C_{\epsilon 1} f_{\epsilon 1} \frac{\epsilon^+}{k^+} P_k^+ - C_{\epsilon 2} f_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^{+2}}{k^+} .$$

여기에서  $\sigma_\epsilon = 1.3$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ , 그리고  $C_{\epsilon 2} = 1.92$

- 무차원화된 에너지 방정식

$$-\frac{\partial}{\partial x_i^+} \left[ (\delta_{ij} / Pr + \nu_{ij}^+ / Pr_T) \frac{\partial T^+}{\partial x_j^+} \right] \quad (6)$$

$$= -U_3^+ .$$

여기에서  $Pr_T = 0.9$

난류 Prandtl 수에 대해서는 많은 모형이 존재하나 봉다발 구조에 적합한 모형으로 널리 받아들여지고 있는 것은 없다. 따라서, 본 연구에서는 난류 열전달 계산에 보편적으로 사용되는 0.9를 사용하기로 한다. 이에 대해서는 앞으로도 많은 연구가 요구된다.

## (2) 비등방성 와류 점성 모형

Kim-Park<sup>8)</sup>은 봉다발 구조 유동장에서 관찰되는 유동맥동 현상에 기초하여 와류 확산의 비등방성 인자를 유도하여 성공적으로 난류 유동장 해석에 적용하였다. 본 연구에서도 Kim-Park의 모형을 사용하여 해석하기로 한다.

- Reynolds 응력

$$-\overline{u_i^+ u_3^+} = \nu_{ij}^+ \frac{\partial U_3^+}{\partial x_j^+} \quad (7)$$

(for  $i \neq j$ ,  $\nu_{ij}^+ = 0$ ),

$$\nu_{11}^+ = C_\mu f_\mu \frac{k^{+2}}{\epsilon^+}, \quad (8)$$

$$\nu_{22}^+ = n \nu_{11}^+.$$

여기에서  $C_\mu = 0.09$

· 비등방성 인자

$$n(r, \theta) =$$

$$\left[ \frac{\overline{6n}}{\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{6y^+}{Re^*}\right)^2\right\} + 1 \right]^{(1-\theta/\theta_{max})}, \quad (9)$$

$$\overline{n} = \frac{1 + 2a_x b \frac{(z_{FP}/D)(\delta/D)}{g/D} Str}{1 + 2a_y (z_{FP}/D) Str}. \quad (10)$$

식 (9), (10)에서,  $y^+$ 는 무차원화된 벽면으로부터의 거리이며,  $a_x$ 와  $a_y$ 는 각각 벽면에 수평 및 수직방향에 대한 속도 계수로

$$a_x = 1.0 - 0.15\left(\frac{g}{D}\right), \quad (11)$$

$$a_y = 0.36\left(\frac{g}{D}\right)$$

를 사용하였다.  $z_{FP}$ 는 봉다발 난류 구조에서 발생하는 유동맥동에 대한 가상 유동의 경로길 이로

$$\frac{z_{FP}}{D} \approx \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{b^2 \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \left(\frac{g}{D}\right)^2} \quad (12)$$

로 근사하였으며,  $\delta$ 는 유로 중심간 거리를 나타낸다.  $b$ 는 유동맥동의 진행 경로 상에 존재할 수 있는 방해물의 효과를 고려하기 위해 도입한 형상인자로

$$b = \begin{cases} 1 & \text{for square array} \\ \frac{2}{3} & \text{for triangular array} \end{cases} \quad (13)$$

를 사용하였다. 그리고,  $Str$ 은 유동맥동의 주진동수  $f_p$ 와 봉 지름 및 마찰속도를 척도로 하는 Strouhal 수로

$$Str = \frac{f_p D}{u^*} \quad (14)$$

본 연구에서는 Wu-Trupp<sup>9)</sup>의 상관식을 채택하였다:

$$Str^{-1} = 0.822\left(\frac{g}{D}\right) + 0.144. \quad (15)$$

### (3) 저-Reynolds 수 모형

원자로 봉다발 구조에 대한 열수력학적 해석의 궁극적인 목표가 봉 표면 온도를 구하는 것이므로, Lam-Bremhorst<sup>10)</sup>의 모형을 사용하여 계산 영역을 봉 표면까지 포함하였다. 따라서, 벽면 경계 조건으로는 난류 유동장 해석에 흔히 사용되는 벽합수 대신에 점착조건을 사용되었다.

· Lam-Bremhorst 감쇠 모형

$$f_\mu = (1 - \exp(-B_\mu R))^2 \left(1 + \frac{D_\mu}{R_t}\right), \quad (16)$$

$$f_{e1} = 1 + \left(\frac{A_{e1}}{f_{\mu}}\right)^3, \quad (17)$$

$$f_{e2} = 1 - \exp(-R_r^2)$$

$$R = k^{+1/2} y^+, \quad (18)$$

$$R_r = \frac{k^{+2}}{\epsilon^+}$$

여기에서  $B_{\mu} = 0.0165$ ,  $D_{\mu} = 20.5$ .  
그리고  $A_{e1} = 0.05$

#### (4) 경계 조건

문제 영역은 봉 표면과 대칭면으로 구성된다. 따라서, 봉 표면에 대한 점착조건과 대칭면에 대한 대칭조건 두 종류의 경계조건이 사용되었다.

봉 표면에서, 속도 및 난류 운동에너지는 점착조건으로부터 모두 0의 값을 갖는다. 그러나, 난류 운동에너지의 소산율의 경우에는 특정한 값으로 표현되는 엄밀한 경계조건이 존재하지 않아 간단하지 않다. 더욱이 흔히 사용되는 몇 가지는 Reynolds 수가 높을 때 수치해가 발산하는 것으로 알려져 있어 사용에 주의를 요한다. 따라서, 본 연구에서는 Kim-Park<sup>(7)</sup>이 제시한 다음 형태의 경계조건을 채택하였다:

$$\epsilon_w^+ = \frac{3k_{w+1}^+}{k_{x-2}^+ - k_{x-1}^+} \epsilon_{x+1}^-. \quad (19)$$

대칭 경계면에 대해서는 축방향 속도, 난류 운동에너지 및 그의 소산율의 수직 구배가 0이라는 대칭조건을 사용하였다.

한편, 온도장 해석에서는 봉 표면에서의 균일 열속을 가정하였는데, 이는 균일 온도 가정에 비해 핵연료의 운전 조건을 보다 잘 반영하는 것이다.

### III. 열유동장 해석

#### (1) 수치 해법

본 연구에 사용된 전산 코드는 Kim-Park의 연구에서 개발된 것으로 유한 요소법을 사용하고 있다. 자세한 수치 해석 기법은 Kim-Park의 연구에 잘 기술되어 있다.

#### (2) 상사성

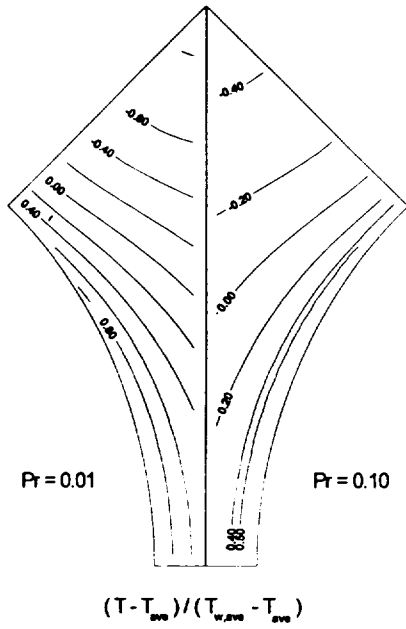
앞서 언급 했듯이 봉다발 구조에서의 난류 열유동장을 Reynolds 수, Prandtl 수, 그리고  $P/D$  등 세 가지의 매개변수를 변화시켜 가면서 해석하였다. 특히 다양한 냉각재를 요구하는 여러 형태의 원자로에서의 열수력 해석에 유용한 정보를 얻어내기 위해서 Prandtl 수를 0.01에서부터 10까지 변화시켜 가면서 계산하였다.

이상의 세 가지 매개변수가 본 연구에서 대상으로 하는 봉다발 구조에서의 열전달을 규정한다는 것은 무차원화된 지배방정식과 무차원화된 보조 관계식들을 살펴봄으로써 알 수 있다. 본 연구에 사용된 방정식 계는 식 (1)-(19)에서 볼 수 있듯이  $Re^*$ 와  $Pr$  두 매개변수에 의존한다. 마찰속도의 정의로부터  $Re^*$ 는 다음의 관계를 갖는다:

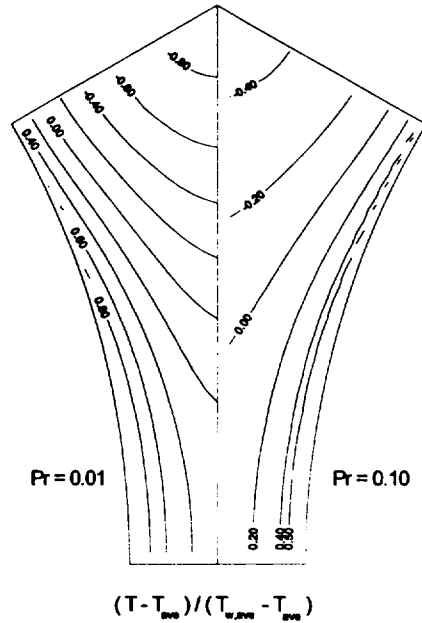
$$\tau_{w,ave} = \frac{f}{8} \rho U_{3,ave}^2 = \rho u^*{}^2, \quad (20)$$

$$Re^* = \frac{u^* D_H}{\nu} = \sqrt{\frac{f}{8}} Re. \quad (21)$$

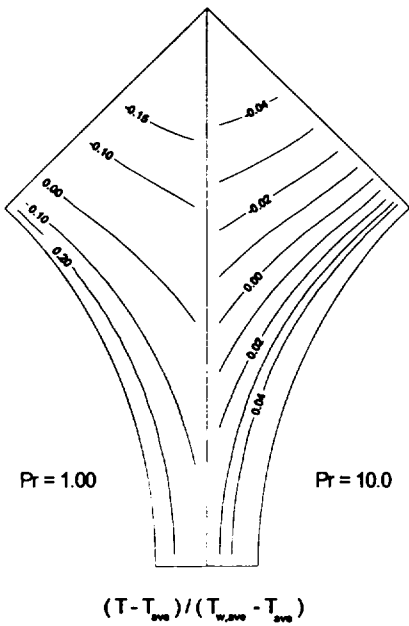
이 때,  $f$  는 마찰계수이다. 따라서,  $Re^*$ 는 마찰계수와  $Re$ 의 함수로 주어지며, 봉다발 구조에서 마찰계수를  $P/D$ 와  $Re$  만의 함수로 볼 수 있으므로 결국  $Re^*$ 는  $P/D$ 와  $Re$  만의 함수로 볼 수 있다. 그러므로, 유동장에 대한 방정식 계는  $P/D$ 와  $Re$  두 매개변수에 의존하



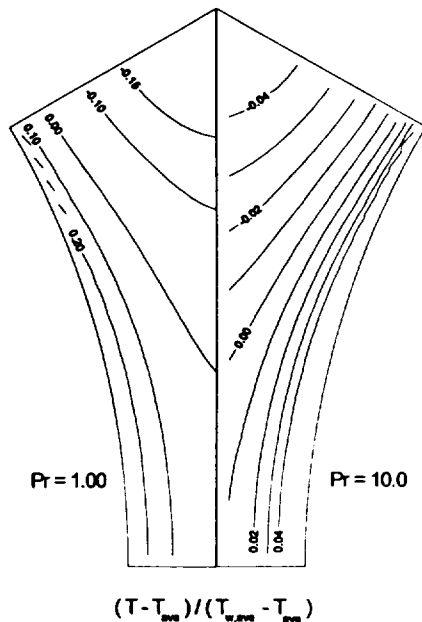
(a)



(a)



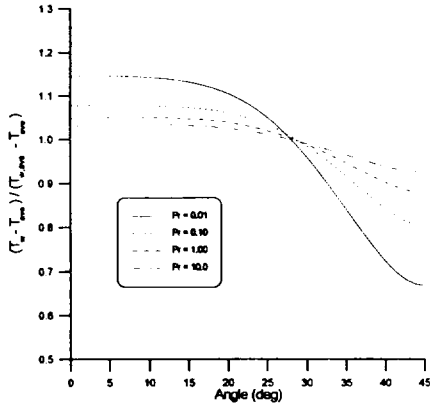
(b)



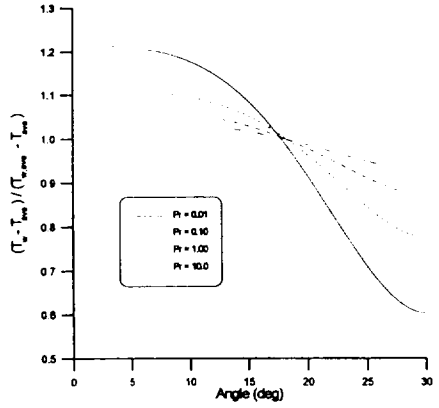
(b)

**Fig. 2** Temperature contour in a square array ( $P/D=1.10$ ,  $Re=105,000$ )

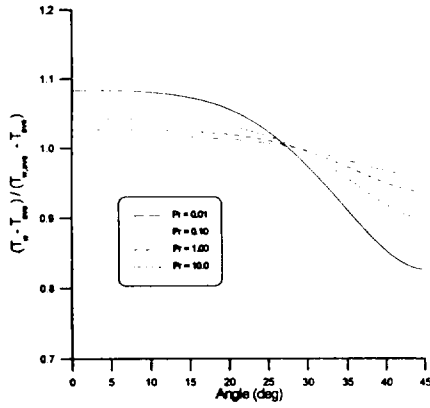
**Fig. 3** Temperature contour in a triangular array ( $P/D=1.10$ ,  $Re=103,000$ )



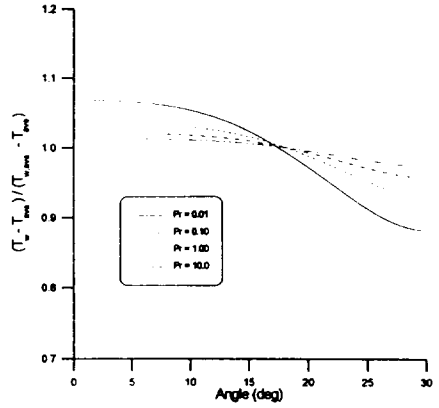
(a) P/D=1.10, Re=105,000



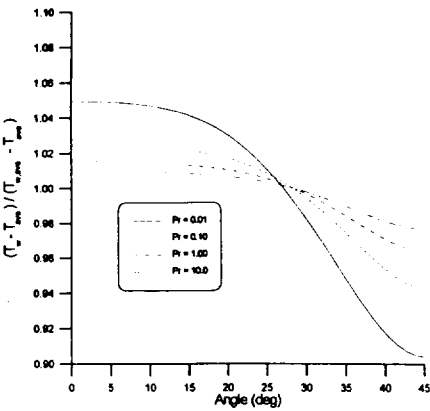
(a) P/D=1.10, Re=103,000



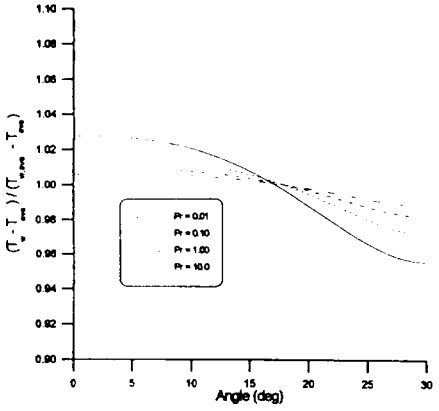
(b) P/D=1.20, Re=105,000



(b) P/D=1.20, Re=105,000



(c) P/D=1.30, Re=107,000



(c) P/D=1.30, Re=107,000

**Fig. 4** Wall temperature variation for a square array

**Fig. 5** Wall temperature variation for a triangular array

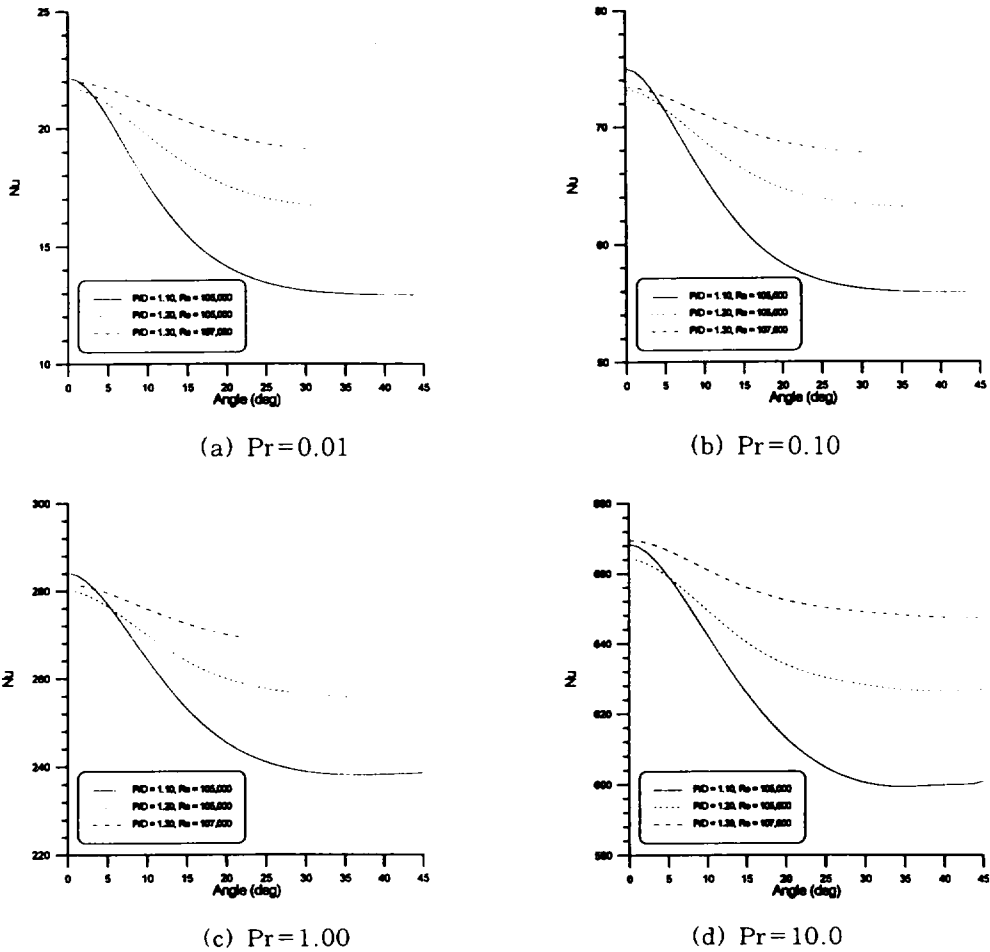


Fig. 6 Local Nusselt number variation for a square array

며, 에너지 방정식 계는 여기에  $Pr$ 를 추가한 세 개의 매개변수에 의존한다고 할 수 있다. 작동유체가 무엇이든지 간에 열전달은 작동유체의 Prandtl 수, 유동의 Reynolds 수, 그리고  $P/D$ 에만 의존한다.

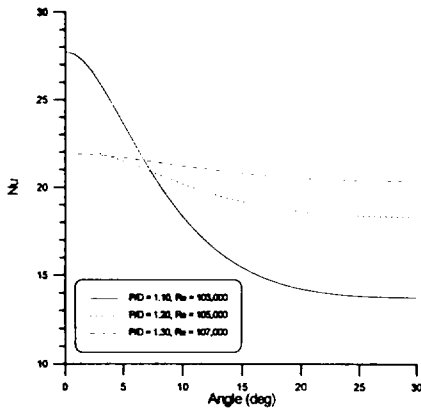
### (3) 해석 결과

그림 2와 3은  $P/D = 1.10$  인 각각 사각 및 삼각 봉 배열 열유동장에서 봉 표면에서의 열속이 균일하다고 가정하였을 때 Prandtl 수의 변화에

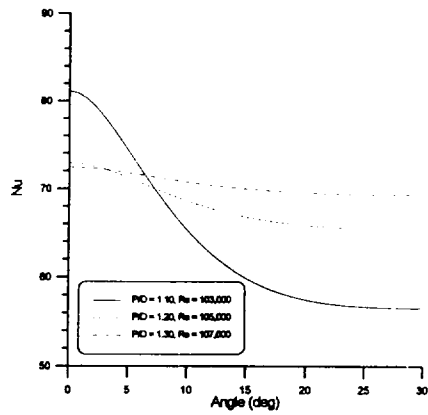
따른 온도 분포를 보여주고 있다. Reynolds 수를 약 100,000으로 하였으며, Prandtl 수는 0.01에서 10까지 변화시켜 계산하였다. 사각 및 삼각 배열에 따른 온도 분포의 두드러진 차이는 관찰되지 않았으나, Prandtl 수의 영향은 매우 크다는 것을 알 수 있었다. Prandtl 수가 작은 경우에는 유동장에 걸쳐 온도 변화가 크게 나타났으나, Prandtl 수가 10인 경우에는 온도 변화가 매우 미미하였다.

사실상 이러한 Prandtl 수의 효과는 봉 표면

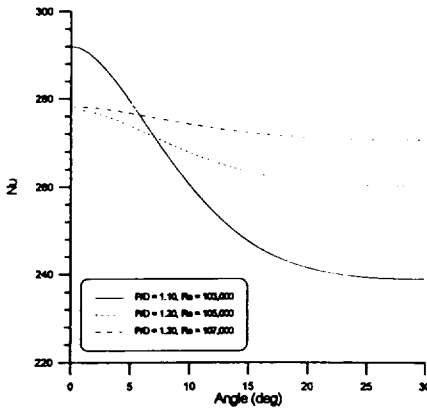




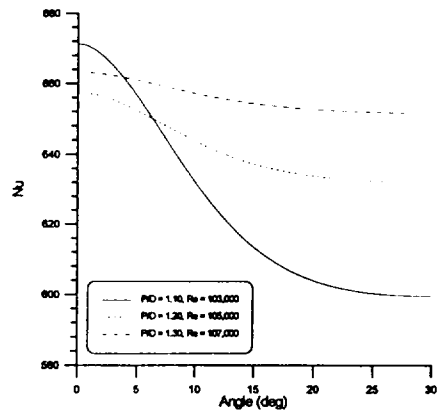
(a)  $Pr=0.01$



(b)  $Pr=0.10$



(c)  $Pr=1.00$



(d)  $Pr=10.0$

**Fig. 7** Local Nusselt number variation for a triangular array

에서의 온도 분포에도 영향을 미친다. 앞서 언급했듯이 유로가 좁은 부분에서는 Prandtl 수에 따라 상당히 심각한 온도 분포가 일어질 수 있다. 이를 살펴보기 위하여  $P/D$ 와 Prandtl 수에 따른 봉 표면에서의 온도 분포를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4와 5는 각각 사각 및 삼각 배열에 대한 것으로, 전반적인 거동은 매우 유사하나 온도 변화의 폭에 다소 차이를 보이고 있다. 사각 및 삼각 배열 모두,  $P/D$ 가 작을수록 표면 온도 변화의 폭이 크며,  $P/D = 1.30$  정도

에서는 거의 봉 표면 온도가 일정하게 나타났다.  $P/D = 1.10$ 에서는 삼각 배열의 경우가 보다 큰 봉 표면 온도차를 나타냈으나,  $P/D = 1.30$ 에서는 사각 배열의 경우에 온도차가 보다 크게 나타났다. 한편, 유동장 전체에 걸친 온도 분포에서와 마찬가지로 Prandtl 수가 작을수록 봉 표면에서의 온도 변화도 크게 나타났다. 따라서, 작동유체로 Prandtl 수가 매우 낮은 액체 금속을 선택한다면, 경우에 따라서는 봉 표면에서의 온도 불균일로 인한 단일 봉에서의 열응력

이 재료의 건전성에 심각한 영향을 초래할 수도 있을 것으로 예상된다.

그림 6과 7은 각각 사각 및 삼각 배열에서 Reynolds 수가 100,000 정도일 때  $P/D$ 에 따른 국부 Nusselt 수의 변화를 보여주고 있다. 사각 봉 배열의 경우에 비해 삼각 봉 배열의 경우에  $P/D$ 가 국부 Nusselt 수 변화에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

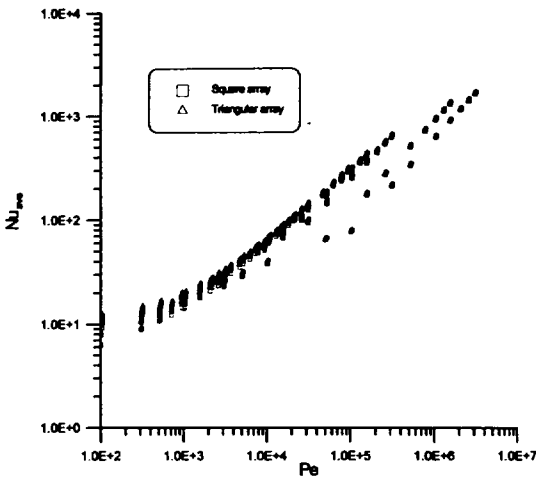


Fig. 8 Nusselt number variation according to Peclet number

그림 8은 Peclet 수의 변화에 따른 평균 Nusselt 수의 변화를 보여주고 있다. Nusselt 수가 봉다발의 배열에는 크게 의존하지 않음을 알 수 있다. 그리고 전체적인 거동은 Peclet 수에 따라 Nusselt 수가 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 계산 결과를 바탕으로

$$Nu = a_0(P/D)^{a_1} Re^{a_2} Pr^{a_3} \quad (22)$$

형태의 Nusselt 수 상관식 구성을 시도하였으나, 분산이 매우 커 도출된 상관식이 유용하지 못하였다. 따라서, 다른 형태의 함수로 시도하여야 할 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

봉다발 구조에서의 난류 유동장을  $k-\epsilon$  2방 정식 모형을 사용하여 수치적으로 예측하였다. 정확한 계산을 위해 봉다발 유동장에서 두드러지게 나타나는 와류 확산의 비등방성을 고려하여 해석하였다. 봉다발 열유동장은 Reynolds 수, Prandtl 수, 그리고  $P/D$ 에 의해 규정되므로, 이들 매개변수를 변화시켜 가면서 계산하였다. 특히, Prandtl 수가 난류 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Prandtl 수를 0.01에서부터 10까지 변화시켜 가면서 계산하였다. 계산 결과,  $P/D$ 가 작은 경우에는 Prandtl 수가 작을 때 봉 표면에서의 온도 변화가 상당히 커질 수 있음을 알았다. 본 연구는 여러 종류의 액체 금속 냉각재가 제안되고 있는 전환로에서 냉각재를 선정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서 난류 Prandtl 수로 상수를 사용하였는데, 이 매개변수가 난류 열전달에 미치는 영향이 매우 크므로 봉다발 구조에 적합한 상관식의 개발과 이를 이용한 계산이 필요하리라 판단된다. 그리고, 지금의 경우처럼 Prandtl 수의 변화가 매우 큰 경우에는 Nusselt 수를 기존에 흔히 사용되는 상관식의 형태인 멱함수 형태로  $P/D$ , Reynolds 수 및 Prandtl 수의 영향을 표현하기 힘들므로 다른 형태의 함수를 도입하여 상관식을 구성하는 노력이 필요하리라 생각된다. 이를 위해서는 봉다발 유동장에서의 난류 열전달 구조에 대한 보다 많은 이해가 선행되어야 할 것이다.

## NOMENCLATURE

$a_x, a_y$  velocity coefficients

$A_{\epsilon 1}$  turbulent model constant

$b$  shape factor

$B_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_\mu$  turbulent model

	constants
$D$	rod diameter
$D_H$	hydraulic diameter
$D_\mu$	turbulent model constants
$f_{e1}, f_{e2}, f_\mu$	damping factors used in Lam-Bremhorst low- Reynolds number $k-\varepsilon$ model
$g$	gap size
$k$	turbulent kinetic energy
$n$	anisotropic factor
$Nu$	Nusselt number
$p$	pressure
$P/D$	pitch-to-diameter
$Pe$	Peclet number
$P_k$	turbulent kinetic energy production rate
$Pr$	Prandtl number
$r$	radial coordinate
$Re$	Reynolds number based on hydraulic diameter
$Str$	Strouhal number
$T$	Temperature
$U_i$	mean velocity of $i$ direction
$\overline{u_i u_j}$	Reynolds stress
$x_i$	coordinate of $i$ direction
$y$	normal distance from the wall
$z_{FP}$	hypothetical path length of flow pulsation

Greek

$\delta$	centroid-to-centroid distance
$\delta_{ij}$	Kronecker delta
$\varepsilon$	dissipation rate of turbulent kinetic energy

$\theta$	azimuthal coordinate
$\nu$	molecular kinematic viscosity
$\nu_{ij}$	anisotropic eddy viscosity
$\rho$	density
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_T$	Prandtl number for turbulent kinetic energy and its dissipation rate, and turbulent Prandtl number
$\tau_w$	wall shear stress

Subscript

$ave$	average
$i, j$	Cartesian index (1 for normal to the wall, 2 for parallel to the wall, 3 for axial direction)
$w$	wall

Superscript

$+$	nondimensionalized variable
-----	-----------------------------

Symbol

overbar	representative value
---------	----------------------

감사의 글

본 연구는 과학기술정책관리연구소에서 시행한 '97 원자력연구개발사업의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

(1) Rehme, K., 1992, The Structure of Turbulence in Rod Bundles and the

- Implications on Natural Mixing between the Subchannels, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 567-581.
- (2) Yeung, M. R. and Wolf, L., 1980, Multi-Cell Slug Flow Heat Transfer Analysis for Finite LMFBR Bundles, Nucl. Eng. Des., Vol. 62, pp. 101-121.
- (3) Dwyer, O. E., 1966, Analytical Study of Heat Transfer to Liquid Metals Flowing In-Line through Closely Packed Rod Bundles, Nucl. Sci. Eng., Vol. 25, pp. 343-358.
- (4) Dwyer, O. E. and Berry, H. C., 1970, Slug-Flow Nusselt Numbers for In-Line Flow through Unbaffled Rod Bundles, Nucl. Sci. Eng., Vol. 39, pp. 143-150.
- (5) Rust, J. H., 1979, *Nuclear Power Plant Engineering*, Haralson Publishing Company, Buchanan, Georgia, pp. 259-271.
- (6) 인왕기, 오동석, 전태현, 정연호, 1997, 범용 전산유체 코드를 이용한 봉다발에서 난류유동 수치해석, 한국원자력학회 '97 추계학술발표회 논문집, pp. 567-572.
- (7) Kim, S. and Park, G.-C., 1995, Numerical Determination of Lateral Loss Coefficients for Subchannel Analysis in Nuclear Fuel Bundles, Proc. NUTERH-7 (NUREG/CP-0142 Vol. 4), pp. 2773-2784.
- (8) Kim, S. and Park, G.-C., 1997, Estimation of Anisotropic Factor and Turbulent Mixing Rate in Rod Bundles Based on Flow Pulsation Phenomenon, Nucl. Tech., Vol. 117, pp. 340-352.
- (9) Wu, X., and Trupp, A. C., 1994, Spectral Measurements and Mixing Correlation in Simulated Rod Bundle, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 1277-1281.
- (10) Lam, C. K. G. and Bremhorst, K., 1981, A Modified Form of the  $k-\epsilon$  Model for Predicting Wall Turbulence, J. Fluids Eng., Vol. 103, pp. 456-460.