

봉다발을 지나는 저 Prandtl 수 유체 유동에서의 난류 혼합율 예측

김신 · 조경호 · 이윤준

제주대학교

제주시 아라1동 1, 690-756

요 약

난류혼합율에 대한 예측은 원자로의 노심 열수력 설계에 있어 매우 중요한 일이다. 봉다발 구조에서 난류혼합의 주요 원인으로 지목되고 있는 유동맥동(flow pulsation) 현상에 대한 척도평가(scale analysis)를 통해 봉다발 유동장을 흐르는 저 Prandtl 수 유체에 대한 난류혼합율 평가식을 유도하였다. 난류혼합에 기여하는 인자가 분자운동, 등방성 난류운동(유동맥동 효과를 배제한 난류운동), 그리고 유동맥동의 세 부분으로 구성되어 있다고 가정하고, 각각에 대한 길이 및 속도척도를 평가하여 난류혼합율을 유도하였다. 평가식에는 P/D , Re 수, Pr 수 등의 인자가 고려되어 있어 다양한 기하학적, 수력학적 조건과 유체의 물리적 특성이 반영되어 있다. 유도된 난류혼합율 평가식을 실험 상관식과 비교하였으며, 비교 결과 만족스러운 것으로 나타났다.

1. 서 론

핵연료집합체는 많은 수의 부수로(subchannel)로 구성되어 있으며, 이 부수로들은 서로 독립적인 유로를 형성하는 것이 아니라 상호 개방되어 있다. 어떤 한 부수로에서의 유동장은 인접 부수로와 질량, 운동량 및 에너지를 상호 교환하면서 주변의 것들과 영향을 주고받는다. 따라서 원자로 내 열수력학적 거동을 정확히 파악하기 위해서는 일차적으로 각각의 부수로를 독립적으로 취급하여 해석하는 것도 필요하지만, 부수로 간에 발생하는 주요 물리량의 상호 교환 과정을 파악하고 해석하는 일이 중요하다.

많은 노심 부수로 해석 코드들이 LP(lumped parameter) 법을 채택하고 있는데, 이들은 부수로 사이에서 발생하는 상호작용의 복잡한 현상을 간단히 모형화하기 위하여 많은 실험상수 또는 실험식들을 사용하고 있다. 부수로 해석 코드가 원자로심의 열유동장을 얼마나 정확히 모사할 수 있느냐 하는 것은 이러한 모형 인자들의 적절한 사용과 밀접한 관계를 갖는

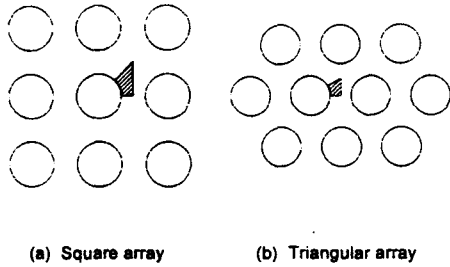


Fig. 1. Schematic of rod bundle geometries

다. 단상유동의 경우에 특히 중요한 모형으로는 교차류(crossflow) 해석 모형과 난류혼합(turbulent mixing) 해석 모형을 들 수 있는데, 이 중에서도 유로 막힘이 없는 한 난류혼합 모형이 보다 중요한 것으로 알려져 있다[1].

난류혼합 현상을 설명하기 위하여 많은 실험들이 수행된 바 있는데, 이들 실험에 의해 부수로 사이에 주기적인 거시적 유동 현상 즉, “순환하며 거의 주기적인 유동맥동(cyclic and almost

periodic flow pulsations)”이 존재하며 이러한 유동맥동 현상이 난류혼합의 주요 원인이라는 사실이 밝혀졌다[2]. 그리고 유동맥동 현상에 대한 체계적인 실험을 통해 유동맥동의 주 진동수는 Reynolds 수와 간극(gap)의 크기에 의존하는 것으로 알려졌다[3-4]. Kim과 Park[5]은 이러한 유동맥동 현상이 난류혼합의 주요 원인이라는 사실을 바탕으로 척도평가론을 통해 난류혼합율에 대한 평가식을 성공적으로 유도하였다. 그러나 Kim과 Park의 모형에서는 Prandtl 수에 대한 효과가 반영되어 있지 않아 액체 금속과 같은 저 Prandtl 수 유체 유동에 대해서는 적용이 불가능하다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 Kim과 Park의 연구에서 채택했던 방법론을 따르면서 Prandtl 수의 효과가 고려된 난류혼합율 평가식을 유도하고자 한다. 난류혼합에 기여하는 요인이 분자운동, 등방성 난류운동(유동맥동을 배제한 난류운동), 그리고 유동맥동 등 세 부분으로 구성되어 있다고 보고 각각에 대한 척도평가를 통해 Prandtl 수가 고려된 난류혼합율 평가식을 유도할 것이다.

2. 난류혼합율 평가식

Fig. 1에서와 같은 봉다발 구조에서 원형관이나 평판 유동에서는 관찰되지 않는 유동맥동 현상이 관찰되는데, 이러한 유동맥동에 의한 큰 척도 와류가 부수로 사이의 간극을 가로지르면서 질량, 운동량, 에너지 등을 혼합하여 난류혼합의 주요 원인이 되는 것으로 알려져 있다. Kim과 Park[5]은 난류혼합이 등방성 난류운동(유동맥동을 배제한 난류운동)과 유동맥동 성분으로 구성되어 있다고 보고 각각에 대한 길이 및 속도척도를 척도 평가하는 방식을 통하여 난류혼합 유효속도를 구하였다. 이 때 Kim과 Park은 유동맥동을 가상 유동으로 모형화하여 유도하였다. 자세한 유도과정은 Kim과 Park에 잘 나타나 있으며, 결과식은 다음과 같다:

$$\frac{U_{eff}}{u^*} = \frac{2}{\gamma^2} \left(a_x \frac{z_{FP}}{D} Str + \frac{1}{2b} \frac{g/D}{\delta/D} \right) \frac{D_H/D}{g/D} \quad (1)$$

여기에서, U_{eff}/u^* 는 마찰속도에 대한 난류혼합 유효속도 비, z_{FP}/D 는 봉 지름에 대한 가

상유동 경로 길이 비, g/D 는 봉 지름에 대한 간극 크기 비, δ/D 는 봉 지름에 대한 부수로 중심간 거리 비, 그리고 D_H/D 는 봉 지름에 대한 수력학 직경의 비이다. 그리고 a_x 는 유동 맥동 진행 방향의 속도계수로, 가상유동으로 모형화한 유동맥동 속력에 대한 가상유동의 수평방향 속도 성분의 평균값이며

$$a_x = 1.0 - 0.15(g/D) \quad (2)$$

을 사용하였다. γ 는 실험상수로 $\gamma=20$ 을 사용하였다(2). 한편 b 는 유동맥동의 진행 경로 상에 방해물이 존재하는 것을 반영하기 위해 도입한 형상인자로 사각 봉배열과 같이 방해물이 없는 경우에는 $b=1$, 삼각 봉배열과 같이 방해물이 존재하는 경우에는 $b=2/3$ 을 사용하였다.

본 연구에서는 이상의 논의에 바탕을 두고 Prandtl 수가 난류혼합율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수평방향 난류 열확산계수 a_p 가 다음과 같이 총류 a_L , 등방성 난류(유동맥동을 배제한 난류) a_T , 그리고 유동맥동 부분 a_x 등 세 부분으로 구성되어 있다고 보고 각 부분에 대한 길이 및 속도척도를 구함으로써 Prandtl 수의 효과가 고려된 난류혼합율 평가식을 유도하였다:

$$a_p = a_L + a_T + a_x = \frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} + a_x \quad (3)$$

여기에서 ν 와 ν_T 는 각각 유체의 동점성계수와 와류점성계수이며, Pr 과 Pr_T 는 각각 유체의 Prandtl 수와 난류 Prandtl 수이다. 좌변과 우변의 두 번째 및 세 번째 항을 각각 속도척도와 길이척도의 곱으로 보고 비례계수를 모두 C 라 하면

$$U_{HP}L_{HP} = \frac{1}{C} \frac{\nu}{Pr} + \frac{1}{Pr_T} u^* \hat{y} + U_x L_x \quad (4)$$

로 쓸 수 있다. 여기에서 L_{HP} 와 U_{HP} 는 총 난류 열확산계수의 길이 및 속도척도이며, \hat{y} 과 u^* 는 간극에서의 최대 속도선까지의 거리(profile length)와 마찰속도로 등방성 난류의 길이 및 속도척도이고, L_x 와 U_x 유동맥동의 길이 및 속도척도이다. C 는 길이척도와 속도척도의 곱으로 난류 열확산계수를 나타내는데 사용된 비례계수로, 모든 난류 성분에 대해 동일한 계수를 사용하였다. 유동맥동의 효과가 지배적이어서 $L_{HP} \sim L_x$ 라면

$$\frac{U_{HP}}{u^*} = \frac{1}{C} \frac{1}{Pr} \frac{\nu}{u^* L_x} + \frac{1}{Pr_T} \frac{\hat{y}}{L_x} + \frac{U_x}{u^*} \quad (5)$$

이다. 우변 각 항을 살펴보면 다음과 같다:

- 총류항

$$\frac{1}{C} \frac{1}{Pr} \frac{\nu}{u^* L_x} = \frac{1}{Pr} \frac{\nu}{\nu_T} \frac{\hat{y}}{L_x} = \frac{1}{Pr} \frac{\hat{y}}{L_x} \left(\frac{\gamma}{Re^{1-B/2}} \sqrt{\frac{8}{\alpha}} \right) \quad (6)$$

여기에서 동점성계수에 대한 와류점성계수의 비는 Rehme(2)가 제시한

$$\frac{\nu_T}{\nu} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{a}{8}} Re^{1-\beta/2} \quad (\alpha=0.18, \beta=0.2, \gamma=20) \quad (7)$$

을 사용하였다.

- 등방성 난류항

$$\frac{1}{Pr_T} \frac{\hat{y}}{L_x} = \frac{1}{Pr_T} \frac{g/D}{2b\delta/D} \quad (8)$$

여기에서 유동맥동의 수평방향 길이척도는 $L_x \sim b\delta$ 로 보았다.

- 유동맥동항

$$\frac{U_x}{u^*} = a_x \frac{z_{FP}}{D} Str \quad (9)$$

여기에서 유동맥동의 주 진동수 f_p 를 기준으로 한 Strouhal 수 $Str = f_p D / u^*$ 상관식은 Wu와 Trupp[4]의 것

$$Str^{-1} = 0.822(g/D) + 0.144 \quad (10)$$

을 사용하였다.

이상을 정리하면 다음과 같다:

$$\frac{U_{HP}}{u^*} = \left(\frac{\gamma}{Pr Re^{1-\beta/2}} \sqrt{\frac{8}{a}} + \frac{1}{Pr_T} \right) \frac{g/D}{2b\delta/D} + a_x \frac{z_{FP}}{D} Str \quad (11)$$

한편 마찰속도에 대한 혼합 유효속도 U_{eff}/u^* 는 Kim-Park[5]에 따라

$$\begin{aligned} \frac{U_{eff}}{u^*} &= C_{eff} C \frac{U_{HP}}{u^*} \\ &= \frac{2}{\gamma^2} \frac{D_H/D}{g/D} \left[\left(\frac{\gamma^2}{Pr Re^{1-\beta/2}} \sqrt{\frac{8}{a}} + \frac{1}{Pr_T} \right) \frac{g/D}{2b\delta/D} + a_x \frac{z_{FP}}{D} Str \right] \end{aligned} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서 비례계수 C 는 원형관 난류유동에 대한 와류점성계수 표현식 (7)과 마찰속도의 정의로부터

$$C = \frac{2}{\gamma} \frac{D_H}{g} \quad (13)$$

을 얻을 수 있으며,

$$C_{eff} = \begin{cases} 1 & \text{for molecular motion} \\ \frac{1}{\gamma} & \text{for turbulent motion} \end{cases} \quad (14)$$

를 사용하였다.

한편 난류혼합 유효속도 평가식인 식 (12)를 살펴보면, 우변 소괄호 안의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 우세한 경우는, 즉 층류 효과가 등방성 난류 효과보다 우세한 경우는 $Pr_T \sim 1$ 이고 $Re = 10^5$ 라 할 때 $Pr < 0.16$ 인 경우임을 알 수 있다. 따라서 $Pr \sim 1$ 인 경우에는 층류항이 등방성 난류항에 비해 상당히 작아서, 층류 효과를 무시하여도 무방하므로 Kim과

Park(5)의 난류혼합율 평가식이 유용하나 $Pr \ll 1$ 에서는 Kim과 Park의 평가식이 난류혼합율을 과소평가하리란 예측을 할 수 있다.

Zhukov 등(6)과 Bogoslovskaya 등(7)은 삼각 봉배열에 대해 실험자료를 근거로 다음의 간극 Stanton 수 상관식을 제안하였다:

$$St_g = \frac{0.393 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} (P/D)^2 - 1 \right)}{Pe^{0.7} (P/D) \sqrt{P/D - 1}} \quad (1.10 < P/D < 1.35, 70 < Pe < 1600, Pr \ll 1) \quad (15)$$

여기에서 Pe 수는 Peclet 수로 Pr 수와 Re 수의 곱을 나타낸다. 한편 평균유속을 U 라 할 때, 난류혼합율을 간극 Stanton 수 $St_g = U_{eff}/U$ 로 표현하면

$$St_g = \frac{2}{\gamma^2} \sqrt{\frac{\alpha}{8}} \frac{D_H/D}{g/D} \left[\left(\frac{\gamma^2}{Pr Re^{1-\beta/2}} \sqrt{\frac{8}{\alpha}} + \frac{1}{Pr_T} \right) \frac{g/D}{2b\delta/D} + a_x \frac{z_{FP}}{D} Str \right] Re^{-\beta/2} \quad (16)$$

로 나타낼 수 있는데, 이 평가식과 실험 상관식을 비교한 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 이때 난류 Prandtl 수는 $Pr_T = 0.9$ 를 사용하였다. 그림에서 보듯이 평가식은 기존의 Kim과 Park(5)의 평가식에 비해 저 Prandtl 수 유체에 대한 난류혼합율을 보다 잘 예측하는 것으로 나타나 본 연구에서 유도된 평가식의 유용성을 입증해 주고 있다. 또한 주목할 만한 점은 난류혼합율의 간극 크기에 대한 거동인데, Prandtl 수가 1 근처인 유체에 대한 난류혼합율 모형인 Kim과 Park의 모형에서는 간극의 크기가 커짐에 따라 난류혼합율이 줄어드나, 실제로는 Prandtl 수가 충분히 작은 경우에 난류혼합율이 간극의 크기가 증가함에 따라 난류혼합율이 증가한다는 점이다. 이는 간극이 커지면서 유동맥동에 의한 영향보다는 열전도에 의한 영향이 우월해 난류혼합에 열전도가 보다 많이 기여하게 됨을 의미한다.

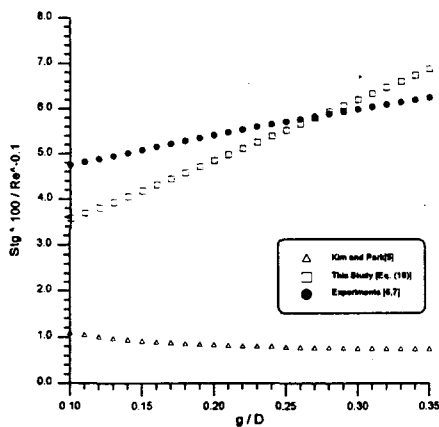


Fig. 2a. Comparison of gap Stanton numbers in a triangular array ($Pr = 0.001, Re = 100000$).

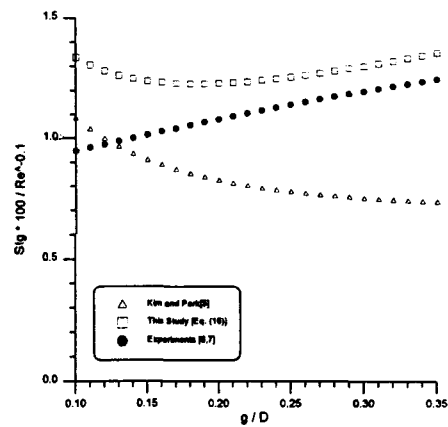


Fig. 2b. Comparison of gap Stanton numbers in a triangular array ($Pr = 0.01, Re = 100000$).

3. 결 론

봉다발 난류 유동장에서 특이하게 관찰되는 유동맥동 현상을 바탕으로 난류혼합율에 대한 평가식을 유도하였다. 특히 Prandtl 수의 효과가 반영된 평가식을 구성하였으며 실험 상관식과 비교하여 그 유용성을 입증하였다. 본 연구에서 도출된 난류혼합율 평가식은 다양한 작동유체에 대해 적용이 가능하므로 액체금속을 냉각재로 사용하는 액금로나, 역시 액체금속을 냉각재로 고려하고 있는 변환로(Transmutation Reactor)의 냉각재 선정 및 열수력 설계에 이용될 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 STEP1에서 시행한 원자력연구개발사업의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 황대현, 박종률, 전태현, 홍성덕, 권혁성, "노심 열수력장 및 임계열속 해석 체제 개선," KAERI/RR-980/90, 한국원자력연구소 (1991).
- [2] K. Rehme, "The Structure of Turbulence in Rod Bundles and the Implications on Natural Mixing between the Subchannels," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 35, 567 (1992).
- [3] S. V. Möller, "On Phenomena of Turbulent Flow through Rod Bundles," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 4, 25 (1991).
- [4] X. Wu, A. C. Trupp, "Spectral Measurements and Mixing Correlation in Simulated Rod Bundle," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 1277 (1994).
- [5] S. Kim, G. C. Park, "Estimation of Anisotropic Factor and Turbulent Mixing Rate in Rod Bundles Based on Flow Pulsation Phenomenon," *Nucl. Tech.*, 117, 340 (1997).
- [6] A. V. Zhukov, P. L. Kirillov, A. P. Sorokin, N. M. Matjukhin, "Transverse Turbulent Momentum and Energy Exchange in the Channels of Complicated Form," *Heat Transfer 1994*, Brighton, Vol. 4, 327 (1994).
- [7] G. P. Bogoslovskaya, A. P. Sorokin, P. L. Kirillov, A. V. Zhukov, P. A. Ushakov, P. A. Titov, "Experimental and Theoretical Studies into Transverse Turbulent Transfer of Momentum and Energy in Complex-Shaped Channels," *High Temperature - USSR*, 34, 903 (1996).