

〈論 文〉

핵연료봉 주위에 형성되는 난류유동장에서 부수로 압력 손실에 대한 해석적 연구

이 계 복*
(1995년 2월 8일 접수)

Analytical Study on the Subchannel Pressure Loss for Turbulent Flow in Bare Rod Bundles

Kye Bock Lee

Key Words : Friction Factor(마찰계수), Subchannel(부수로), Fuel Rod Bundle(핵연료봉 다발), Law of Wall(벽면법칙), Wall Friction Velocity(벽면마찰속도)

Abstract

A theoretically based prediction for the determination of the subchannel friction factor at low pitch to the rod diameter ratio ($P/D < 1.2$) in the bare rod bundle flow has been developed. The present model assumes the validity of the Law of Wall over the entire flow area. The algebraic form of the Law of the Wall is integrated over the entire flow area and the local friction velocity variation along the rod periphery is considered in this study. The present method is applied to the rod bundles with $P/D < 1.2$, and the prediction results show good agreement with the available experimental data.

기 호 설 명

A : 채널유동 면적
 a, b : 상수
 D : 봉직경
 D_h : 부수로의 수력직경
 f : Fanning 마찰계수
 f_s : Blasius 원형관 상관식에 의한 마찰계수
 f_r : 벽면전단응력 분포로부터 계산된 마찰계수
 $F(\theta)$: θ 의 함수
 P : 봉배열의 피치
 r : 봉중심으로부터 반경방향거리
 R : 봉반경
 Re : Reynolds 수, $\bar{u}D_h/\nu$
 u : 유속

\bar{u} : 평균유속
 u^* : 국부 마찰속도, $\sqrt{\tau_w/\rho}$
 \bar{u}^* : 평균 마찰속도, $\sqrt{\bar{\tau}_w/\rho}$
 y : 벽면으로부터 수직거리
 y^+ : 무차원 벽거리, $\frac{u^*y}{\nu}$
 λ : Darcy 마찰계수, $4f$
 θ : 봉주위의 원주방향
 ρ : 밀도
 τ_w : 국부벽면 전단응력

1. 서 론

대부분의 원자로 노심은 사각형이나 삼각형으로 배열된 많은 수의 핵연료봉으로 구성되어 있고 핵

*정회원, 한국원자력연구소 유체계통개발분야

연료봉을 따라 냉각수가 흐르게 된다. 따라서 유동 단면이 비원형을 이루게 되어 관유동과는 다른 유동장 특성을 보여준다. 핵연료봉 주위의 유동장내에서 마찰계수는 원자로 설계를 위해 필요한 열수력 인자로서, 피치와 직경비 P/D 가 1.2보다 큰 경우, 같은 레이놀즈수에서 관내를 흐르는 유동에 비해 커지게 된다.⁽¹⁾

핵연료봉 주위의 난류유동장은 매우 복잡하기 때문에 주로 실험을 통하여 유동장의 구조를 이해하려는 연구가 많이 수행되어 왔다. 실제로 원자로의 열수력 설계데이터 생산을 위해 주로 사용하는 설계방법은 여러 실험을 통해 측정된 자료를 사용하여 매우 보수적으로 구한 상관 관계식이다. 그러나 이렇게 구해진 상관식은 사용될 때 여러 제한 조건이 부가된다. 지금까지 수행된 해석적 연구나 실험적 연구를 종합해 보면 핵연료봉 주위의 난류 유동장에서의 압력손실은 기하형태에 대한 일반적인 해가 없고 유동장의 기하형태가 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

지금까지 수행된 해석적 연구는 크게 세가지로 분류할 수 있다. 첫번째 방법은 관직경 대신에 유동장의 수력직경을 관의 마찰계수에 대한 상관식에 적용하는 것으로 간단하지만 실제 실험데이터와 많은 편차를 보여주는 경우가 존재한다.⁽²⁾ 두번째 방법은 등가 환형영역방법(equivalent annulus region method)으로 각 연료봉 주위의 원소 부위(elementary cell)를 같은 면적을 갖는 환형으로 치환하여 환형에 대해 개발된 상관 관계식을 사용하는 것이다.⁽²⁾ 그러나 이 방법은 실험결과에 비해 상대적으로 큰 값을 예측하고 있다. 마지막으로 Rehme는 주어진 기하형태에서 층류유동에 대한 기하인자(geometry factor)를 알 수 있으면 난류유동장에 대해서도 마찰계수를 간단하게 구할 수 있는 방법을 개발하였다. 그러나 이 방법은 층류 유동에 대한 기하인자를 반드시 알아야 하는 제한 조건이 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 벽면이 존재하는 모든 유동 단면에서 성립되는 속도에 대한 벽면법칙을 핵연료봉 주위의 난류유동장에 적용하여 마찰계수에 대한 해석적 방법을 개발하였다. Scott와 Webb⁽⁴⁾은 내부에 핀이 장착된 관유동에 대해 벽면법칙을 적용하여 마찰 계수를 예측하였다. 즉, 속도에 대한 벽면법칙의 대수 형태를 각 채널에 대해 적분하여 마찰 계수에 대한 관계식을 유도하였다. 그러나 이 방법

은 모든 벽면에서의 벽면마찰속도가 균일한 경우로 제한되어 있다. 액체 금속을 냉각수로 사용하는 고속 증식로의 경우 핵연료봉들의 피치 대 연료봉 직경비가 작아서($P/D < 1.2$) 핵연료봉 벽면을 따라 마찰속도가 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 벽면마찰속도가 균일하지 않은 경우에 대해 적용할 수 있는 해석적 방법을 개발하였다. 즉, 속도에 대한 벽면법칙을 사용하여 마찰 계수를 구하기 위해서는 벽면마찰속도가 필요한데 원형관이나 $P/D > 1.2$ 인 핵연료봉 주위의 유동장에서는 이 값이 거의 균일하다. 그러나 $P/D < 1.2$ 인 경우 벽면 전단응력은 핵연료봉 벽면을 따라 원주방향으로 유동단면에서의 이차 유동 영향으로 균일하지 않다.

본 연구에서는 마찰속도의 변화를 고려하여 작은 피치 대 봉 직경비를 갖는 난류유동장에 대해 마찰 계수를 예측할 수 있는 해석적 방법을 개발하였고 예측결과와 실험치를 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다.

2. 이론해석

본 연구의 이론적 근거는 속도에 대한 벽면 법칙이다. 즉, 속도에 대한 벽면법칙은 채널형태나 관의 직경에 관계 없이 성립된다. 벽면근처에서 ($y^+ > 26$) 속도에 대한 벽면법칙의 대수형태는 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\frac{u}{u^*} = 2.5 \ln\left(\frac{yu^*}{\nu}\right) + 5.5 \quad (1)$$

관유동에서의 마찰계수는 방정식 (1)을 관의 전 영역에 적용하여 쉽게 예측할 수 있다. 즉 방정식 (1)을 전 영역에 대해 적분하고 $\frac{\bar{u}}{u^*} = \sqrt{2/f}$ 인 관계식을 사용하면 다음과 같이 마찰계수 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = 2.5 \ln\left(Re\sqrt{\frac{f}{2}}\right) + 1.75 \quad (2)$$

Hartnett 등⁽⁶⁾은 정방향과 사각형 채널의 유동장에서 전 유동단면에 대해 방정식 (1)을 적분하여 마찰 계수를 예측하였다. Scott와 Webb⁽⁴⁾은 내부에 핀이 장착된 관 유동에 대해 본 이론을 적용하여 마찰계수를 예측하였다. 그들은 복잡한 기하 형태를 고려하여 적분이 용이하도록 유동단면을 2개의 유동영역, (1) 내부 핀영역 (2) 중심영역으로 구분하였다.

Fig. 1은 채널 벽면이 없는 무한개의 핵연료봉으로 구성된 무한 봉다발의 전형적인 기하형태를 보여준다. 삼각형과 사각형 배열에서 비원형 단면을 갖는 각각의 부수로를 나타내고 있다. 기하학적 유사성을 이용하면 평균속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int u dA$$

$$\frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \int_0^{\frac{P}{2} \sec \theta - R} u (R+y) dy d\theta \quad (3)$$

여기서,

$$A = \int_0^{\theta_{\max}} \frac{1}{2} (\frac{P}{2} \sec \theta - R) (\frac{P}{2} \sec \theta + R) d\theta$$

$u^* = \bar{u}^* F(\theta)$ 로 정의하면, 적분결과는 다음과 같다.

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}^*} = \frac{(2.5 \ln \frac{\bar{u}^*}{\nu} + 5.5)}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{1}{2} F(\theta) \cdot (\frac{P}{2} \sec \theta - R) (\frac{P}{2} \sec \theta + R) d\theta$$

$$+ \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} 2.5 F(\theta) \ln(F(\theta)) d\theta$$

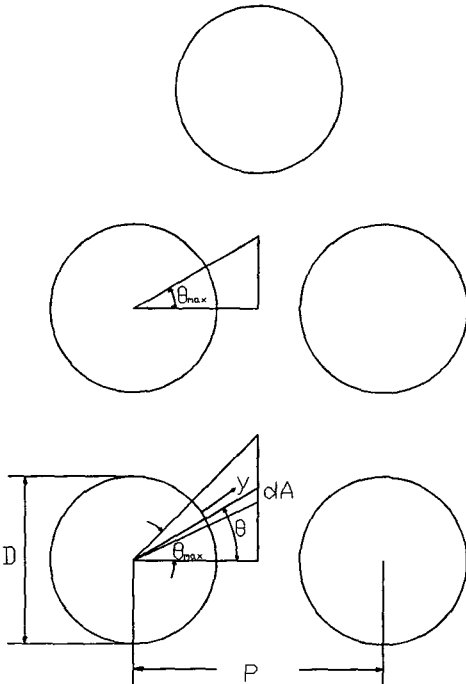


Fig. 1 Schematic diagram of infinite bare rods of triangular and square array

$$+ \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{2.5}{2} F(\theta) (\frac{P}{2} \sec \theta - R) \cdot (\frac{P}{2} \sec \theta + R) \ln(\frac{P}{2} \sec \theta - R) d\theta$$

$$- \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{2.5}{4} F(\theta) (\frac{P}{2} \sec \theta - R) (\frac{P}{2} \sec \theta + 3R) d\theta \quad (4)$$

$\frac{\bar{u}}{\bar{u}^*} = \sqrt{(2/f)}$ 의 관계를 이용하여 부수로 마찰계수를 구하면,

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = \frac{1}{A} [2.5 \ln(Re \sqrt{\frac{f}{2}} / D_h) + 5.5]$$

$$\int_0^{\theta_{\max}} \frac{1}{2} F(\theta) (\frac{P}{2} \sec \theta - R) \cdot (\frac{P}{2} \sec \theta + R) d\theta$$

$$+ \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} 2.5 F(\theta) \ln(F(\theta)) d\theta$$

$$+ \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{2}{2.5} F(\theta) (\frac{P}{2} \sec \theta - R) (\frac{P}{2} \sec \theta + R) \ln(\frac{P}{2} \sec \theta - R) d\theta$$

$$- \frac{1}{A} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{4}{2.5} F(\theta) (\frac{P}{2} \sec \theta - R) (\frac{P}{2} \sec \theta + 3R) d\theta \quad (5)$$

평균마찰속도 \bar{u}^* 는 $\sqrt{\bar{r}_w/\rho}$ 로 정의되고 $Re = \bar{u} D_h / \nu$, D_h 는 수력 직경이다. 국부마찰속도가 일정하면 방정식 (5)를 이용해서 쉽게 마찰계수를 구할 수 있다.

Fig. 2는 사각형의 맨봉 배열에서 평균값에 대해 정규화된 벽면 전단 응력을 나타낸다.^(7,8) 평균 벽면전단응력은 다음과 같이 정의된다.

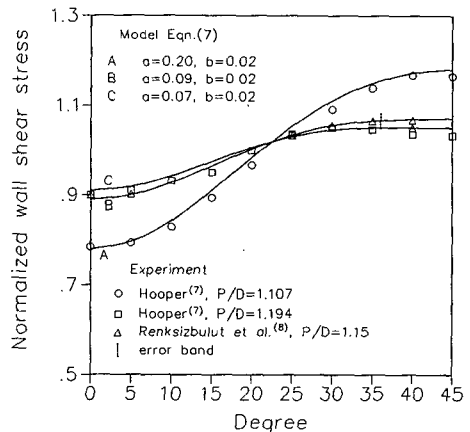


Fig. 2 Wall shear stress variation in the square array

$$\bar{\tau}_w = \frac{1}{\theta_{max}} \int_0^{\theta_{max}} \tau_w d\theta \quad (6)$$

사각형 배열의 경우 $P/D=1.10$ 이하에 대해서는 보고된 실험데이터를 발견할 수 없었다. 벽면전단응력은 실험장치의 주변 경계조건의 영향을 제거하기 위하여 중심에 위치하는 부수로에서 측정되었다. 실험장치가 무한개의 봉배열을 모사하는 것을 보여주는 적절한 방법은 대칭면에서의 측정량의 대칭 정도를 보여주는 것이다. Hooper⁽⁷⁾는 벽면전단응력, 평균 축방향속도, 난류응력 등이 $\theta=0^\circ$ 에 대해 대칭인 것을 보여 주었다. 그러나 $\theta=45^\circ$ 에 대해서는 벽면 전단응력은 완전대칭을 보여주지는 못했다. 따라서 $\theta=45^\circ$ 는 기하학적 측면에서 완전대칭은 아닌 것을 보여준다. $\theta=45^\circ$ 의 대칭은 실험장치의 크기에도 좌우되는데 Hooper는 $\theta=45^\circ$ 근처에서의 작은 편차는 심각하지 않다고 결론지었다.

주어진 피치 대 봉직경비에 대해 사각형 배열이나 삼각형 배열 모든 경우에서 완전히 발달된 난류유동의 정규화된 벽면 전단응력분포는 레이놀즈수에 무관하다.^(9,10) 또한 벽면 전단응력변화는 피치 대 봉직경비가 커질수록 줄어든다. 즉 피치 대 봉직경비가 1.2 보다 큰 경우 벽면전단응력은 봉주위를 따라 거의 일정하다. 그러나 피치 대 봉 직경비가 1에 접근할수록 벽면전단응력은 봉 벽면을 따라 원주방향으로 변하게 된다.

Fig. 3은 삼각형 배열을 갖는 핵연료봉 주위의 유동장에서 Subbotin 등,⁽¹¹⁾ Fakory와 Todreas⁽⁹⁾ 그리고 Trupp과 Azad⁽¹⁾에 의해 측정된 국부벽면

전단응력분포를 보여준다. Subbotin 등의 실험 채널은 삼각형 배열을 갖는 4개의 매끈한 맨봉(bare rod)으로 이루어진 2개의 셀로 구성된다. 측정 부수로는 중심에 위치한 부수로로 주변 경계조건의 영향을 거의 받지 않는다. 실제로 그들은 층류유동에 대한 실험을 수행하여 측정 채널이 거의 무한개의 봉배열과 같은 결과를 보여주는 것을 검증하였다. Fakory와 Todreas⁽⁹⁾의 실험에서 사용된 측정 단면은 4개의 매끈한 맨봉으로 구성된 6개의 부수로이다. 주변 경계조건을 최소화하기 위해 측정은 중심에 위치한 2개의 부수로에서 수행되었다. Trupp과 Azad⁽¹⁾의 실험장치는 19개의 매끈한 맨봉으로 이루어진 24개의 부수로로 구성된다. 측정은 다른 실험과 마찬가지로 주변 경계조건의 영향을 줄이기 위해 내부 부수로에서 수행되었다. Trupp과 Azad⁽¹⁾의 측정치가 다른 실험에 비해 무한개의 봉배열 측정결과에 가장 근접할 것이다.

규정화된 벽면전단응력 실험데이터를 함수로 표시하기 위해 Renksizbulut와 Hadaller⁽⁸⁾는 cosine 함수를 제안하였다. 본 연구에서는 삼각형과 사각형으로 배열된 무한개의 맨봉 유동에서 국부 벽면전단응력을 모사하기 위해 다음의 함수 형태를 개발하였다.

$$\frac{\tau_w}{\bar{\tau}_w} = 1 - a \cos 6\theta - b \cos 12\theta, \text{ 삼각형 배열}$$

$$\frac{\tau_w}{\bar{\tau}_w} = 1 - a \cos 4\theta - b \cos 8\theta, \text{ 사각형 배열} \quad (7)$$

$\tau_w = \rho u^*{}^2$ 의 관계를 사용하면 규정화된 국부 마찰속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{u^*}{\bar{u}^*} &= \sqrt{\frac{\tau_w}{\bar{\tau}_w}} \\ &= \sqrt{1 - a \cos 6\theta - b \cos 12\theta}, \text{ 삼각형 배열} \\ &= \sqrt{1 - a \cos 4\theta - b \cos 8\theta}, \text{ 사각형 배열} \end{aligned} \quad (8)$$

상수 a, b 는 피치 대 봉직경비에 의존하고 이용 가능한 실험데이터를 사용하여 상수를 구하면 다음과 같다.^(7-9,11)

사각형 배열경우의 상수 a, b

P/D	1.107	1.15	1.19
a	0.20	0.09	0.07
b	0.02	0.02	0.02

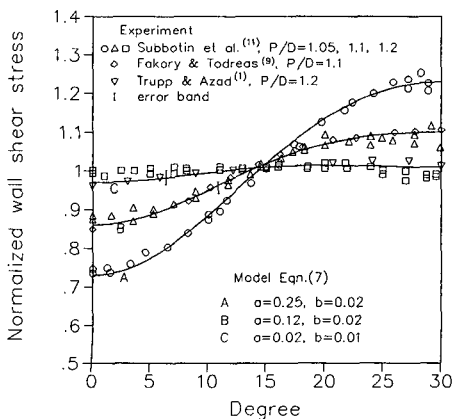


Fig. 3 Wall shear stress variation in the triangular array

삼각형 배열경우의 상수 a, b

P/D	1.05	1.10	1.20
a	0.25	0.12	0.02
b	0.02	0.02	0.01

방정식 (8)을 방정식 (5)에 대입하면 무한개의 맨봉으로 구성된 난류유동장의 부수로 마찰계수를 예측할 수 있다.

3. 결과 및 토의

본 해석방법에 의한 계산결과를 실험결과와 비교하였다. 본 연구에서는 삼각형이나 사각형으로 배열된 무한개의 맨봉으로 구성된 난류유동장에 대한 해석으로 채널벽면에 의한 영향은 무시하였다. 해석 예측치의 검증에 사용된 실험데이터는 무한개의 맨봉 배열을 모사하도록 주변 경계조건을 제거하기 위해 내부 부수로에서 측정되었다.

작은 피치 대 봉직경비를 갖는 삼각형 배열의 맨봉들이 형성하는 난류유동장에서의 부수로 마찰 계수에 대한 예측치와 실험치를 Fig. 4에 나타냈다. 실험은 Eifler와 Nijsing^(12,16)에 의해 수행되었고 주변 벽면효과를 제거하기 위해 벽면전단응력은 내부 부수로에서 측정되었다. 그림에서 f 는 본 해석방법에 의해 예측된 마찰계수이고 f_s 는 Blasius 원형관 마찰계수 상관식에 의해 계산된 마찰 계수이다.

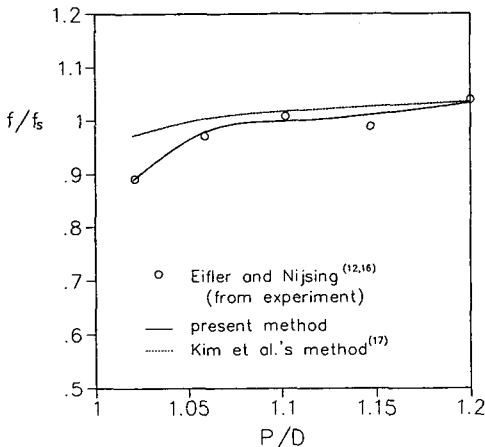


Fig. 4 Influence of rod spacing on friction factor in the triangular array

$$f_s = 0.079 Re^{-0.25} \quad (9)$$

본 해석방법의 예측치가 실험치와 잘 일치하고 있다. 그림에서 점선은 국부 벽면마찰속도를 일정한 값으로 가정한 경우로 피치 대 봉직경비가 1에 근접할수록 실험치와 잘 맞지 않는다. 따라서 이 가정이 성립되지 않는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 5는 Fakory와 Todreas,⁽⁹⁾ Rehme⁽¹³⁾ 그리고 Subbotin⁽¹¹⁾ 등에 의해 측정된 마찰계수와 레이놀즈수와와의 관계를 보여준다. Fakory와 Todreas⁽⁹⁾의 실험장치는 $P/D=1.1$ 인 삼각형 배열로 실험장치의 경계조건에 의한 영향을 제거하기 위해 내부에 위치한 부수로에서 측정을 수행하였다. 마찰계수는 평균 벽면전단응력을 사용하여 다음의 관계식

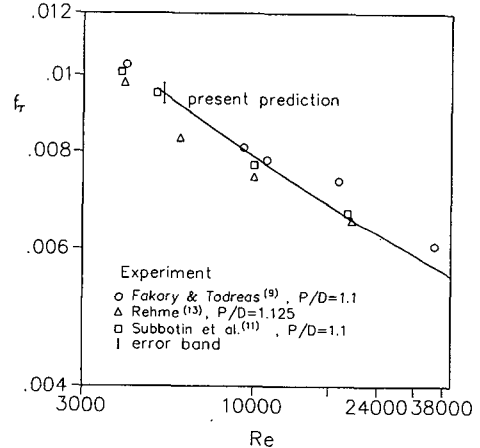


Fig. 5 Comparison of present prediction with previous experimental data

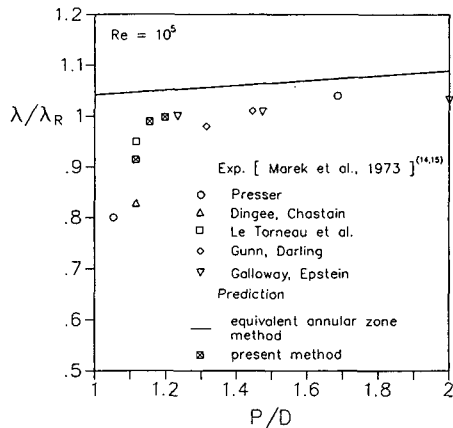


Fig. 6 Subchannel friction factors of bare rods in the square array ($Re=10^5$)

에서 계산된다.

$$f_{\tau} = \frac{\left(\frac{D}{2} \frac{\pi \bar{\tau}_w}{6}\right)}{\left(A \frac{4}{D_h} \frac{\rho}{2} \bar{u}^2\right)} \quad (10)$$

여기서, $\bar{\tau}_w = \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \tau_w d\theta$

본 해석방법에 의한 예측치가 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 6은 레이놀즈수가 10^5 인 사각형 배열에서 측정된 실험결과와 해석방법에 의한 계산치들을 보여주고 있다.^(14,15) 모든 마찰계수 값은 같은 레이놀즈수에서의 관유동 마찰계수 값에 의해 규정화시킨 값이다. 등가 환형 해석방법은 모든 영역에서 매우 보수적인 예측치를 나타낸다. 본 해석방법은 피치 대 봉직경비가 작은 경우에도 실험치와 잘 일치하고 있다. 그림에서 λ 는 Darcy 마찰계수이고 λ_R 은 매끈한 관유동에서의 Darcy 마찰계수값이다.

$$\frac{1}{\lambda_R} = 2.035 \log[Re \sqrt{\lambda_R}] - 0.989 \quad (11)$$

4. 결 론

무한개의 맨봉으로 형성된 난류유동장의 부수로 마찰계수를 구하는 해석방법을 개발하였다. 본 모델은 전 유동장에서 속도에 대한 벽면법칙을 적용하였다. 작은 피치 대 봉직경비를 갖는 유동장에 대한 국부벽면 마찰속도분포에 대한 함수를 이용 가능한 실험데이터를 통해 개발하였다. 기존의 해석 방법이 실험데이터를 이용한 단순한 상관식 개발이지만, 본 해석방법은 이론적 근거를 갖고 개발되었다.

본 해석방법을 사용한 예측치는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 본 연구를 통해 작은 피치 대 봉직경비를 갖는 유동장에서 봉주위를 따른 국부 벽면 전단응력분포가 부수로 마찰계수에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

참고문헌

(1) Trupp, A. C. and Azad, R. S., 1975, "The Structure of Turbulent Flow in Triangular Array Rod Bundles," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 32, pp. 47~84.

(2) Rehme, K. 1973, "Simple Method of Predicting Friction Factors of Turbulent Flow in Non-Circular Channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 933~950.

(3) Todreas, N. E. and Kazimi M. S., 1990, *Nuclear Systems II, Elements of Thermal Hydraulic Design*, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 285~308.

(4) Scott, M. J. and Webb R. L., 1981, "Analytical Prediction of the Friction Factor for Turbulent Flow in Internally Finned Channels," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 423~428.

(5) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, New-York, pp. 614~619.

(6) Hartnett, J. P., Koh J, C. Y. and McComas S. T., 1962, "A Comparison of Predicted and Measured Friction Factors for Turbulent Flow through Rectangular Ducts," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 82~88.

(7) Hooper, J. D., 1980, "Developed Single Phase Turbulent Flow Through a Square-Pitch Rod Cluster," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 60, pp. 365~379.

(8) Renksizbulut, M. and Hadaller G. I., 1986, "An Experimental Study of Turbulent Flow Through a Square-Array Rod Bundle," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 91, pp. 41~55.

(9) Fakory, M. and Todreas N., 1979, "Experimental Investigation of Flow Resistance and Wall Shear Stress in the Interior Subchannel of a Triangular Array of Parallel Rods," *Trans. ASME J. Fluids Engng.*, Vol. 101, pp. 429~435.

(10) Hooper, J. D. and Wood D. H., 1984, "Fully Developed Rod Bundle Flow Over a Large Range of Reynolds Number," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 83, pp. 31~46.

(11) Subbotin, V. I., Ushakov P. A., Levchenko Y. D. and Alexandrov A. M., 1972, *Velocity Field of Turbulent Fluid Flow in a Longitudinal Stream-line of a Cluster of Rods*, AEC-TR-7189.

(12) Eifler, W. and Nijsing R., 1966, "Experimental Investigation of Velocity Distribution and Flow Resistance in Triangular Array of Parallel Rods," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 5, pp. 22~42.

(13) Rehme, K., 1972, "Pressure Drop Perfor-

- mance of Rod Bundles in Hexagonal Arrangements," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 2499~2517.
- (14) Marek, J., Maubach K. and Rehme K., 1973, "Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Rod Bundles Arranged in Square Arrays," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 2215~2228.
- (15) Maubach, K., 1970, "Reibungsgesetze turbulenter Strömungen," *Chemie-Ing. Tech.*, Vol. 42, pp. 995~1004.
- (16) Aranovitch, E., 1971, "A Method for the Determination of the Local Turbulent Friction Factor and Heat Transfer Coefficient in Generalized Geometries," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 93, pp. 61~68.
- (17) Kim, N. H., Chun T. H., Lee S. K. and Kim S. H., 1991, "Application on the Law of the Wall to Predict Friction Factors for Turbulent Flow in a Rod Bundle," *the 1st JSME/ASME Joint Int. Conference on Nucl. Engrg.*, pp. 231~235.