

3X3 봉다발에서의 국소 열전달에 관한 실험적 연구

정장환, 정문기
한국원자력연구소

유성연
충남대학교

요 약

물질전달과 열전달의 유사성을 이용하는 나프탈렌 승화법을 핵연료집합체 모델에 적용하여 봉다발에서의 국소 열전달 계수의 분포를 측정하였다. 실험 모델은 가압경수형 원자로에서 나타나는 부수로 즉, 벽면 부수로와 모서리 부수로 및 내부 부수로로 구성되는 3x3 봉다발이다. 봉다발에서의 국소 열전달 계수 값은 부수로의 형상과 인접한 봉 및 벽면의 영향이 크게 작용하는 것으로 측정되었다. 내부 부수로에 둘러져 있는 봉에서의 국소 열전달계수값은 봉과 봉 사이에서는 부수로 중심 방향보다 낮았고, 평균 열전달계수는 Dittus-Boelter의 상관식보다 약간 낮은 값을 보였다. 벽면 부수로에 인접한 봉에서의 열전달계수는 벽면의 영향으로 내부 부수로에 있는 봉보다 상대적으로 낮았으며, 모서리 부수로의 봉에서는 벽면의 영향이 증대되어 더욱 낮게 나타났다.

1. 서 론

원자로에 장전된 핵연료다발에서의 유로의 모양은 연료봉의 배열방식에 따라서 사각형 혹은 삼각형 등이 나타난다. 이 비원형 유로에서의 열수력학적 특성은 일반 배관의 원형 단면과는 다른 양상을 보이며 난류 유동특성은 더욱 복잡하게 되는데, 이것은 유로의 기하학적 형상이 열수력 거동에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다. 최근에는 레이저 유속계를 이용하여 핵연료집합체 부수로내에서의 난류유동 실험을 수행하고 있으나, 국소열전달 측정 실험에서는 열전대 부착시의 유동의 교란과 측정점의 제한등으로 인하여 어려움을 겪고 있다. 이러한 측정상의 어려움을 해결할 수 있는 새로운 방법이 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달실험이다.

Reynolds와 Prandtl등에 의해 운동량전달과 열전달의 유사성이 알려진 이후 열전달과 물질전달의 유사성도 함께 연구되어 왔으며, 그 이후 유사성을 이용한 여러가지 물질전달 실험 방법이 개발되었으며 그 중에서 나프탈렌승화법이 널리 사용되고 있다.^{(1),(2)} 이 실험방법에서는 나프탈렌

승화량을 측정하여 물질전달계수를 구하며, 열전달과 물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 물질 전달계수로 부터 열전달계수를 도출한다.

원자노심에서의 열전달 연구는 원자로의 안전성에 직결된 임계열유속에 관한 연구에 집중되고 있으며, 핵연료봉의 국소 열전달에 관한 실험적 연구는 측정의 어려움 때문에 잘 이루어지지 않고 있다.⁽³⁾ 본 연구에서 가압경수형 원자로에 사용되는 핵연료집합체를 실험 모델로 하여 물질전달 실험을 수행하였고, 열/물질전달의 유사성 관계식을 이용하여 사각형의 내부 부수로, 벽면 부수로 및 모서리 부수로에 인접한 핵연료봉 표면의 국소 열전달특성을 조사하였다.

2. 유사성 관계식

비압축성 유체의 열전달과 물질전달 현상을 나타내는 지배방정식을 무차원변수로 표시하면 다음과 같다.

에너지방정식 (열전달):

$$\frac{DT}{D\tau} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Pr}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

물질농도방정식 (물질전달):

$$\frac{Dw}{D\tau} = \frac{1}{Re Sc} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Sc}{Sc_t} \right) \frac{\partial w}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

윗식에서 온도분포와 농도분포는 열경계 조건과 물질농도 경계조건이 같고, 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같을 경우에는 Prandtl수와 Schmidt수를 서로 바꾸면 동일한 방정식으로 표시된다.

일반적으로 강제대류 열전달에서 열전달계수를 구하는 실험식은 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (3)$$

강제대류물질전달에서 물질전달계수를 구하는 실험식도 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Sh = C Re^m Sc^n \quad (4)$$

식(1-3)을 식(1-4)로 나누면 다음과 같은 열전달과 물질전달의 유사성 관계식이 얻어진다

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^n \quad (5)$$

3. 실험

3.1 실험장치 및 측정방법

나프탈렌 승화열전달 실험에 사용되는 실험장치는 풍동, 승화량 측정장치, 시험시편 등으로 구성된다. 실험에 이용된 풍동은 개방 송출형으로서 최대 유속은 33 m/s 이며, 시험부의 단면의 크기는 폭이 300 mm 높이가 300 mm이다. 나프탈렌의 승화량을 측정하기 위해서는 스텝 모터가 설치된 Traverse table, 깊이 측정 센스 및 컴퓨터 등으로 구성된 승화깊이 측정장치를 이용하였다. 시편 표면에서의 깊이 측정 센스의 최소 이동거리는 0.01 mm 이며, 깊이 측정시의 정밀도는 0.1 μm 이다.

시험 시편의 표면에 나프탈렌을 부착시키는 방법으로는 주조법을 채용하므로써 매끄러운 나프탈렌 표면을 얻을 수 있었다. 주조된 시험시편은 승화깊이 측정장치에 설치하여서 풍동에서의 유동 시험전에 기준면으로 부터 초기 깊이를 측정하며, 깊이 측정이 끝난 시편을 풍동에 설치한 후 약 한 시간 동안 유동에 노출시켜 시험시편에 주조된 나프탈렌을 승화시킨다. 풍동에서의 유동 시험후 시편의 두께 변화량을 다시 승화깊이 측정장치에서 측정하므로써 실질적인 승화량을 산출하게 된다. 측정된 시편의 승화량으로 부터 물질전달계수는 다음식으로 부터 구한다.

$$h_m = \rho_s \Delta t / \rho_{v,w} \Delta \tau \quad (6)$$

윗식에서 ρ_s 는 나프탈렌 시편의 밀도이며, $\rho_{v,w}$ 는 시편 표면에서의 나프탈렌 증기의 밀도 이다. 또한 Δt 는 승화량 즉 나프탈렌의 깊이 변화량이며 $\Delta \tau$ 는 풍동에서 유동에 노출한 시간이다. 실험으로 부터 얻은 물질전달계수는 다음과 같이 Sherwood 수로 나타낼 수 있다.

$$Sh = h_m d / D \quad (7)$$

윗식에서 d 는 나프탈렌 시편의 특성 길이이며, D 는 나프탈렌의 공기중에서의 물질확산 계수이다.

3.2 봉다발 시험시편

본 실험에서 사용된 봉다발은 그림 1과 같이 사각형의 내부 부수로와 벽면 부수로 및 모서리 부수로가 있는 9개의 봉으로 구성된 3X3봉다발이다. 봉다발을 구성하는 봉의 직경은 30 mm 이고 길이는 약 1 m 이며, 봉과 봉사이의 유로 간격은 6 mm 이고 벽면과 봉사이의 유로간격은 3 mm 이다. 그림 2와 같이 봉다발을 사각채널에 장전한 후 풍동의 시험대에 설치하여 풍동에서 발생된 공기의 흐름이 봉다발내로 지나가도록 하였다. 사각채널의 후단에는 원관을 설치하여 이 원관으로 흘러가는 유량을 피토 튜브로 측정함으로써 시험대에서의 유량을 산출하였고 공기 흐름의 온도는 RTD 로써 측정하였다. 나프탈렌 시편은 봉의 길이방향 중간위치인 선단에서 480 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 나프탈렌 주조시편은 그림 1에 나타난 바와 같이 내부 부수로만 주위에 위치하는 봉A, 벽면 부수로에 인접한 봉B 및 모서리 부수로에 위치하는 봉C에 각각 설치하여 물질전달 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 3은 봉다발의 중심에 위치하여 주위에 내부부수로만 존재하는 봉A에서 채널내의 평균유속이 4.9 m/s인 경우의 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 각도 기준점은 나프탈렌 시편의 윗쪽에 위치하는 봉과 간격이 가장 가까운 곳을 0도로 잡고 유동의 상류측에서 봉다발을 볼때 시계 방향으로 5도씩 각도를 이동하면서 측정된 값이다. 측정된 나프탈렌의 두께변화량은 유사성 관계식에 대입하여 Nusselt수로 표시하였고, 관계식의 지수 n 값은 1/3을 사용하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 봉다발의 봉사이의 간격 위치인 0도, 90도, 180도 및 270도 에서의 물질전달계수는 부수로의 중심쪽 방향인 45도, 135도, 225도 및 315도 위치에서의 값과 비교할때 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 거의 동일한 열전달계수의 분포가 매 90도 마다 반복되는데 이는 주변의 부수로의 모양이 같으므로 각 부수로에서의 유동분포도 동일하기 때문이다.

그림 4는 채널내의 평균유속이 4.9 m/s인 경우 봉A, 봉B 및 봉C에서의 각도 변화에 따른 열전달계수의 분포를 나타낸 것이다. 전반적인 열전달계수의 값은 내부부수로에 인접한 봉A에서 가장 크며, 그 다음이 벽면부수로에 인접한 봉B, 모서리 부수로에 인접한 봉C가 가장 작게 나타나고 있다. 이는 사각채널내의 유속이 채널의 벽면으로 갈수록 작아지기 때문인 것으로 보인다. 그림에서 270도-360도 영역은 부수로의 형태에 따른 열전달계수 값이 비교되고 있는데, 모서리부수로와 벽면부수로에 인접한 봉의 열전달계수는 내부부수로에 인접한 봉보다 크게 낮은 값을 나타내고 있지만 모서리부수로와 벽면부수로 사이에는 큰 차이는 나타나지 않고 있다.

그림 5는 유속이 4.9 m/s 일때 모서리 부수로에 인접한 봉C의 나프탈렌시편에서 원주방향으로 평균한 열전달계수를 유동방향에 대하여 나타내었다. 나프탈렌 시편의 구조부위에 유동방향으로 11개의 위치에서 측정된 값의 원주방향 평균치로서 유동방향의 하류로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 평판유동의 물질전달 실험에서 나타난 바와 같이 나프탈렌이 주조된 영역에서 형성된 물질전달 경계층의 두께가 증가됨에 따라서 급격히 감소되며 동일한 현상이 열 경계층 실험에서도 나타나고 있다. 본실험에서 얻은 시편 후단부의 열전달계수값은 등온경계조건인 관유동에서 유체가열시에 널리 이용되는 Dittus-Boelter의 상관식에 비하여 약간 크게 나타났다.

핵연료의 열수력 설계시에 적용하고 있는 부수로내의 모든 열수력학적 변수가 일정하다고 가정하는 부수로 해석방법은 봉다발내의 실제 열전달 현상과는 상당한 차이가 있음이 밝혀졌다. 부수로의 형상에 따라서 열전달계수의 분포는 크게 변하며, 봉다발내에서 봉과 봉사이의 간격에서의 열전달계수는 부수로의 중심을 향한 부위에 비하여 상당히 낮게 나타나고 있다. 봉다발의 입계 열유속 실험결과를 보면 비등위기(boiling crisis)는 봉과 봉사이의 간격부위에서 일어나는 경우가 많은데 이는 본 연구에서 나타난 바와 같이 간격부위나 벽면에 인접한 부위의 열전달계수가 상대적으로 낮기 때문임을 알수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로의 연료봉다발 모델에 대한 물질전달실험을 수행하여 핵연료봉다발에서의 국소열전달계수를 구하였다. 실험에 사용된 핵연료집합체 모형은 3x3 봉다발로서 가압경수형 원자로에서 나타나는 부수로 즉, 벽면부수로와 모서리부수로 및 내부부수로에서의 국소열전달계수를 구하였다. 실험결과를 보면 봉다발에서의 열전달계수의 분포는 부수로의 형상에 따라서 크게 다르게 나타났다. 내부 부수로에 둘러져 있는 봉시편의 평균 열전달계수는 Dittus-Boelter의 상관식 보다 약간 낮은 값을 보였으나, 국소 열전달계수의 분포를 보면 인접한 봉의 영향이 잘 나타나고 있다. 벽면 부수로에 인접한 봉시편의 열전달계수는 벽면의 영향으로 내부 부수로에 있는 봉시편 보다 상대적으로 낮았으며, 모서리 부수로의 봉시편에서는 벽면의 영향이 증대되어 더욱 낮게 나타났다.

나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험으로 부터 열전대로써 측정하기 어려운 봉다발에서의 국소열전달계수를 효과적으로 얻을 수 있었다. 봉다발에서 얻은 국소 열전달 실험자료는 원자로 열수력해석을 국소변수 해석방법으로 접근하는데 있어서 기초자료로 활용될 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- [1] P.R. Souza Mendes and W.F.N. Santos, "Heat transfer and pressure drop experiments in air-cooled electronic-component arrays", J. Thermophys. Heat Transfer, Vol.1, pp373-378, 1987.
- [2] C.H. Chung, M.K. Chung, and S.Y. Yoo, "A study on heat/mass transfer from rectangular cylinders using naphthalene sublimation technique" Proceedings on Experimental Heat transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, pp.539-545, 1993.
- [3] 이계복, 장호철, 권혁성, 이상근, "핵연료봉 주위의 난류 유동장 특성에 대한 연구 현황과 검토", J. of the KNS, Vol.25, No.2, 1993.

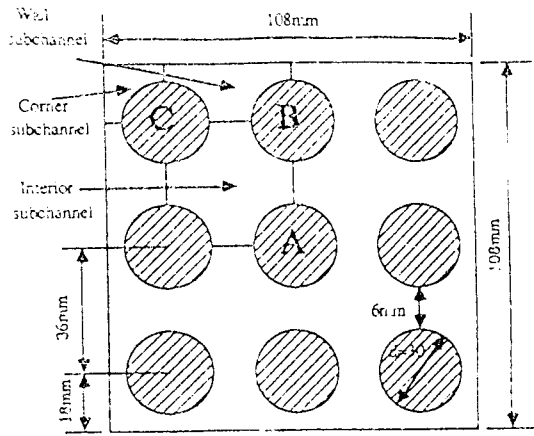


Fig.1 Cross sectional view of 3 x 3 rod bundle

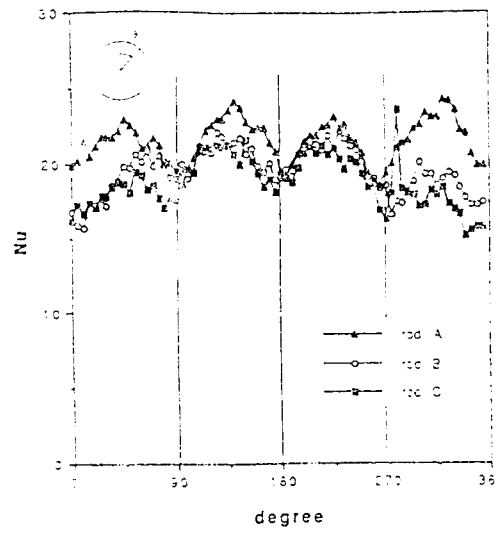


Fig.4 Comparison of heat transfer coefficient distributions of rod A, rod B and rod C

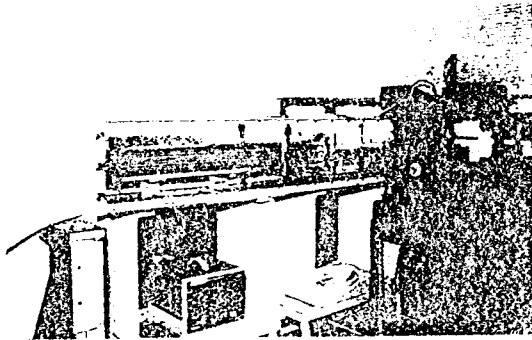


Fig.2 Photo of rod bundle assembly in wind tunnel

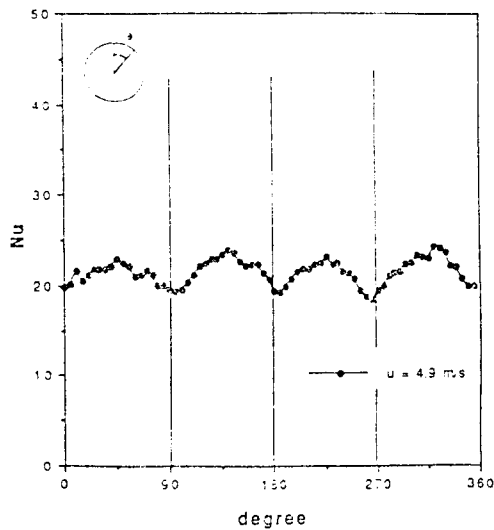


Fig.3 Heat transfer coefficient distribution on rod A

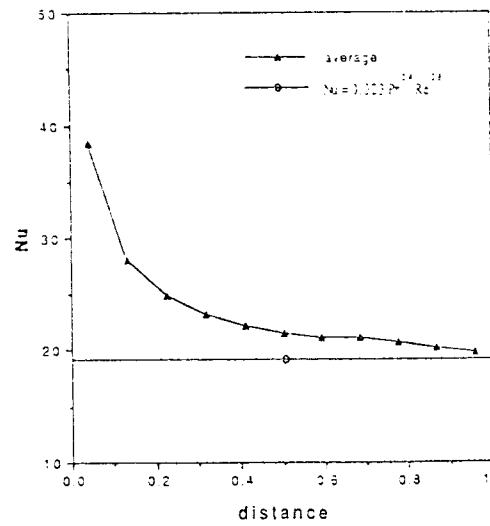


Fig.5 Average Nu distribution along rod A