

핵연료 봉다발에서의 국소열전달 특성 해석

이중섭, 정장환, 오광석, 김선철
한국원자력연구소

유성연
충남대학교

요약

내부부수로, 벽면부수로, 모서리부수를 포함하는 가압경수로형 원자로의 핵연료집합체를 모의하는 3X3 봉다발을 모델로 수치해석을 통해 봉다발 주변의 유동특성을 알아보고 각 봉에서의 원주방향 위치에 따른 국소열전달 특성에 관해 고찰하였다. 봉다발에서 열전달계수의 분포는 벽면영향으로 인한 각 부수로에서의 유속분포와 밀접한 관계가 있으며 내부부수로에 인접한 봉에서 가장 높았고, 그 다음이 벽면부수로, 모서리부수로에 인접한 봉에서는 가장 작게 나타났다. 현재 핵연료의 열수력 설계시에 적용하고 있는 부수로 내의 모든 열수력학적 변수가 일정하다고 가정하는 부수로 해석방법은 봉다발내의 실제 열전달 현상과는 상당한 차이가 있음을 보여주었다.

1. 서론

원자로 노내에서 발생하는 열수력 현상의 근본적 이해는 정상운전 상태의 원자로 최적설계 뿐만 아니라 사고시의 원자로 해석에 있어서 매우 중요하다. 원자로의 노심은 핵연료봉의 다발로 구성되어 있고 핵연료봉에서 발생된 열은 축방향으로 흐르는 주위의 냉각수에 전달된다. 핵연료봉과 인접한 핵연료봉으로 구성되는 수로의 모양은 핵연료봉의 배치방식에 따라서 주로 사각형 또는 삼각형이 된다. 이를 원자로심 열수력 해석시에는 부수로(subchannel)라고 말하며 이 부수로와 핵연료봉에서의 열전달현상이 많이 연구되고 있다. 원자로의 핵연료다발은 노심에서의 장전 위치에 따라서 내부부수로(Interior subchannel), 벽면부수로(Wall subchannel) 및 모서리부수(Corner subchannel)로 등 여러 형태의 부수로는 형성된다. 핵연료다발에서 나타나는 비원형 부수로에서의 열수력학적 거동은 일반 배관의 원형 단면일 때와는 매우 다른 양상을 보이는 데 이것은 유로단면의 기하학적 형상과 크기가 열수력학적 거동에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다[1]. 핵연료의 열수력특성에 관한 연구로서는 원자로의 운전조건을 모의한 유체유동시험에서 핵연료집합체의 압력강하, 핵연료부수로에서의 유속분포 등을 측정하고 있다. 그러나 열전달 실험에서는 대개 열전대를 사용하나 열전대의 부착, 단열 등의 어려움 때문에 간단한 온도측정 밖에 하지 못하고 있다.

최근에는 정장환[2]은 나프탈렌승화법을 이용하여 원자로의 핵연료집합체를 모의하는 3X3 봉다발 모델에서 연료봉표면의 국소열전달계수를 측정하였다. 나프탈렌승화법은 물질전달과 열전달의

유사성[3]을 이용하는 실험방법으로 열교환기의 3차원 유동이나 복잡한 형상의 국소(local) 열전달 측정에 적용하고 있다[4]. 본 연구에서는 나프탈렌승화법 실험에 사용된 내부부수로, 벽면부수로, 모서리부수를 포함하는 3X3 봉다발을 모델로 수치해석하였으며 이 수치해석결과를 나프탈렌승화법 실험결과와 비교 분석하여 봉다발 내에서의 속도분포와 국소열전달계수 특성에 대해 고찰하였다.

2. 지배방정식과 수치해석기법

핵연료 봉다발에서의 유동과 열전달 현상을 해석하기 위한 지배방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}] + S_\phi \quad (1)$$

여기서 좌변 첫번째 항은 검사체적 내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내고, 두번째항은 대류항(convection term), 우변 첫번째항은 확산항(diffusion term), 두번째 항은 생성항(source term)을 나타낸다. 변수 ϕ 에 따라 지배방정식이 달라지며 $\phi=1$ 인 경우 연속방정식, $\phi=u, v, w$ (속도)인 경우는 운동량 방정식, $\phi=H$ (엔탈피)인 경우는 에너지방정식, $\phi=k$ 와 ϵ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 각각의 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_ϕ 와 생성항 S_ϕ 는 다른 형태로 표시된다. 유한체적법(FVM:Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (1)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_f (A_f - S_p) = \sum_f (A_f \phi_f) + S_c \quad (2)$$

범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT[5]를 사용하여 차분방정식 (2)의 해를 구하였다. FLUENT는 완전내연기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 Code로서 속도와 같은 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라량을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid)를 사용한다. 대류항을 계산하기 위한 격자점간의 보간은 power-law scheme을 사용했고, 난류모델은 k- ϵ 모델, 수치해법은 SIMPLE algorithm을 사용하였다. 해의 수렴판정은 속도, 압력, 엔탈피 각각의 계산영역 전체 잔류항의 총합이 10^{-6} 이하가 되는 시점으로 보았다.

$$\overline{R} = \frac{\sum_{nodesP} | [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P] |}{\sum_{nodesP} | (A_P \phi_P) |} \leq 10^{-6} \quad (3)$$

3. 경계조건 및 격자구조

본 해석에서 사용된 봉다발은 Fig. 1과 같이 핵연료집합체에서 전형적으로 나타나는 사각형의 내부부수로와 벽면부수로 및 모서리부수로가 있는 9개의 봉으로 구성된 3X3 봉다발이다. 봉다발을 구성하는 봉의 직경은 30 mm 이고 길이는 약 1 m이며, 봉과 봉사이의 유로 간격은 6 mm이고 벽면과 봉사이의 유로간격은 3 mm이다. 본 해석에서는 나프탈렌실험과의 비교분석을 위해 실제 원자로 운전조건과는 다른 다음과 같은 경계조건을 가정하였다. 봉다발은 50 °C로 일정하게 유지되고 사각채널의 벽면은 단열이며 채널 입구에서는 균일한 속도 4.9 m/s로 20 °C의 공기

가 유입이 된다. 벽면에서의 유속은 정지유속조건(no-slip condition)을 만족하며 계산의 정확도를 위해 벽면합수를 표면부근에 적용하였다. 입구속도와 수력직경에 기준한 Reynolds 수는 5200 이고 이 때의 유동은 완전한 난류라 볼 수 없는 전이유동(transitional flow)이지만 본 연구에서는 난류(turbulent)로 가정하였다. Mach 수가 매우 낮으므로 이 유동을 비압축성으로 간주하여 압력에 따른 밀도의 변화는 무시하였다. 그러나 온도차에 의한 공기의 밀도변화는 이상기체의 상태방정식을 사용하여 고려하였다. 난류모델에 대한 운동에너지(k)값을 위해 입구에서의 난류강도는 5%로 주었고 소산율(ϵ)을 위한 특성길이는 수력직경을 사용하였다.

봉다발은 좌우상하가 대칭이기 때문에 Fig. 2와 같이 모든 부수로를 포함하는 1/4 만 해석하였고 이와같은 계산 영역은 x방향으로 19선, y방향으로 37선, z방향으로 73선으로 구성되었다. x방향은 유선방향(streamwise)으로서 공기가 유입되는 입구에서 출구쪽에서의 방향을 양(positive)으로 했고, z방향은 유선을 가로지르는 방향(cross stream)으로서 채널의 너비 방향이며, y방향은 xz평면에 수직인 방향으로서 아래에서 위로의 방향이 양이다. z방향으로의 격자는 봉 표면에서의 열전달계수 변화를 알아보기 위해 봉표면에서 격자로 인한 오차가 발생되지 않도록 봉과 평행하게 따라가게 하였고 격자의 밀도는 봉과 벽면에 높게 배치하였다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 3은 유속 4.9 m/s의 유동이 완전히 발달된(fully developed)된 유동방향 한 단면에서의 속도분포를 나타낸다. 사각채널의 입구에서 유입된 공기가 하류측으로 진행하면서 벽면에서 유체의 점성으로 인한 마찰저항때문에 벽면에서 가까운 곳의 속도는 점차 줄어들며 경계층을 형성하게 되고 이에 따른 질량보존의 법칙에 의해 부수로 중앙에서는 속도가 점점 증가하게 된다. 이와같이 경계층이 완전히 발달된 곳에서의 속도분포를 보면 내부부수로에서 가장 크게 나타나고, 그 다음이 벽면부수로, 모서리부수로에서는 가장 작게 나타난다. 또한 속도분포는 부수로 중앙에서 벽과 봉으로 갈수록 벽면 영향에 의해 작아지게 된다.

봉다발에서의 대류열전달현상에 의한 국소열전달계수를 다음과 같이 계산하였다.

$$h = q / (T_w - T_b) \quad (4)$$

q 는 국소점에서의 열유속(Heat flux)이고 T_w 는 봉의 온도이며 T_b 는 유동장의 평균온도(bulk temperature)다. 위 식에서 구한 국소열전달계수 h 값을 나프탈렌실험에서 구한 무차원 열전달계수와 비교 분석하기 위해 다음과 같이 Nuseelt 수로 무차원화 하였다.

$$Nu = hd / k \quad (5)$$

위 식에서 k 는 열전도계수이며 d 는 특성길이로서 수력직경(Hydraulic diameter)을 사용하였다.

Fig. 4는 유속이 4.9 m/s일때 봉다발의 중심에 위치하여 주위에 내부부수로만 존재하는 봉A의 원주방향으로 평균한 열전달계수를 유동방향에 대하여 나타낸 것으로 유동방향의 하류로 갈수록 열전달계수는 감소 한다. 이는 열경계층의 두께가 하류로 갈수록 증가하기 때문이며 열경계층이 발달되는 입구영역 부근에서의 열전달계수는 급격히 감소하나 유동방향의 하류로 갈수록 열경계층이 어느정도 발달됨에 따라 열전달계수는 거의 일정하게 나타난다.

Fig. 5는 채널내의 평균유속이 4.9 m/s인 경우 유동이 완전히 발달된 곳에서 봉A, 봉B 및 봉C

에서의 각도 변화에 따른 열전달계수의 분포를 나프탈렌승화법 실험에서 얻은 결과와 함께 나타낸 것이다. 수치해석에서는 대칭조건에 의해 봉 A와 B에 대해서는 일부 각도에만 계산값이 나오지만 나프탈렌실험과의 비교를 위해 0도에서 360도까지 반복적으로 나타내었다. 그림에서 각도 기준점은 봉의 윗쪽에 위치하는 봉과 간격이 가장 가까운 곳을 0도로 잡고 유동의 상류측에서 봉다발을 볼 때 시계방향으로 5도씩 각도를 이동하면서 나타난 값이다.

봉다발의 중심에 위치하여 주위에 내부부수로만 존재하는 봉A에서 보면 봉사이의 간격 위치인 0도, 90도, 180도 및 270도 위치에서의 열전달계수는 부수로의 중심쪽 방향인 45도, 135도, 225도 및 315도 위치에서의 값과 비교할 때 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는데 그 이유는 부수로 중심쪽이 봉과 봉사이의 영역에 비해서 유속이 빠르기 때문이다. 벽면에 인접한 봉B에서 보면 벽면부수로에 인접한 0-90도 영역과 270-360도 영역에서는 내부부수로에 인접한 90-270도 영역보다 상대적으로 낮은 값을 나타내는데 이것은 채널 벽면의 영향으로 벽면부수로내의 유속이 내부부수로에 비해 상대적으로 낮기 때문이다. 채널 벽면과 봉사이(0도)에서는 봉과 봉사이(90, 180, 270도)에 비해 더 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 벽과 봉사이가 봉과 봉사이보다 간격이 좁기 때문에 더욱더 벽면 효과가 크게 작용하여 유속이 낮기 때문이다. 모서리에 인접한 봉C에서 보면 모서리부수로에 인접한 270도-360도 영역에서는 다른 부수로에 인접한 영역에 비해 벽면의 영향이 증대되어 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는데 이것은 모서리 부수로내의 유속이 다른 형태의 부수로에 비하여 더욱 낮기 때문이다. 봉B에서와 마찬가지로 벽과 봉사이(0, 270도)에서는 봉과 봉사이(90, 270도)에 비해 더욱 낮은 값을 나타낸다. 봉 A,B,C에 대한 전반적인 열전달계수의 값을 비교해 볼때 내부부수로에 인접한 봉A에서 가장 크며, 그 다음이 벽면부수로에 인접한 봉B, 모서리 부수로에 인접한 봉C가 가장 작게 나타나고 있다. 이는 각 부수로에서의 유속분포와 밀접한 관계가 있으며 사각채널내의 유속이 채널의 벽면으로 갈수록 작아지기 때문이다. 그림에서 270도-360도 영역은 부수로의 형태에 따른 열전달계수 값이 비교되고 있는데, 내부부수로, 벽면부수로, 모서리부수로에서의 차이를 잘 보여주고 있다.

수치해석결과와 나프탈렌승화법을 이용한 실험결과를 비교해보면 부수로의 형상이나 위치에 따른 전체적인 열전달계수의 분포는 비슷하나 벽과봉, 봉과봉사이의 값과 부수로 중앙점에서의 열전달계수 차이가 실험보다 크게 나타나는데 이는 수치해석에서 실험보다 벽면 영향이 보다 크게 작용한 것으로 보인다.

5. 결론

가압경수로형 원자로의 핵연료집합체를 모사한 내부부수로, 벽면부수로, 모서리부수호가 형성되는 3X3 봉다발에 대해 각 봉에서의 원주방향에 따른 열전달계수 분포를 알아 보았다. 각 봉에서의 열전달계수 분포는 부수로의 형상에 따라서 크게 다르게 나타났으며 봉에 인접한 부수로에서의 속도분포와 비슷한 양상을 나타내었다. 내부부수로에 둘러져 있는 봉의 열전달계수의 분포는 봉과 봉 사이에서는 부수로 중심 방향보다 낮았고, 벽면부수로에 인접한 봉의 열전달계수는 벽면의 영향으로 유속이 감소됨에따라 내부부수로에 인접한 봉보다 상대적으로 낮았으며, 모서리부수로에 인접한 봉에서는 벽면의 영향이 증대되어 더욱 낮게 나타났다. 벽과 봉사이에서는 봉과 봉사이보다 간격이 좁아 벽면 효과가 더 크게 작용하여 더욱 낮게 나타났다. 현재 핵연료의 열수력

설계시에 적용하고 있는 부수로내의 모든 열수력학적 변수가 일정하다고 가정하는 부수로 해석방법은 봉다발 내의 실제 열전달 현상과는 상당한 차이가 있음을 보여주었다. 봉에 인접한 부수로의 형상에 따라서 봉에서의 열전달계수 분포가 달라지며 동일한 봉에서도 원주방향의 국소열전달계수가 부위에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 봉다발의 임계 열유속 실험결과를 보면 비등위기 (boiling crisis)는 봉과 봉사이의 간격 부위에서 일어나는 경우가 많은데 이는 본 연구에서 나타난 바와 같이 이 부위에서 국소열전달계수가 상대적으로 낮아서 연료봉의 표면온도가 상승하기 때문임을 알수있다. 본 연구에서 얻은 결과들은 원자로 열수력 해석 방법을 부수로 해석방법에서 국소 변수 해석 방법으로 전환하기 위한 기초자료로 활용될 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- [1] 이계복, 장호철, 권혁성, 이상근, “핵연료봉 주위의 난류 유동장 특성에 대한 연구 현황과 검토”, J. of the KNS, Vol. 25, No. 2, 1993.
- [2] Thoma, “Hochleistungskessel”, Julius Springer, 1921
- [3] 정문기, 정장환 외 다수, “원전 안전계통 실증시험 : 승화 열전달 실험”, KAERI/RR-1502/94, 1995
- [4] 유성연, 이상운, 이중섭, 박동성의 다수 “와류발생기를 사용한 고효율 납작관형 핀-관 열교환기 개발에 관한 중간보고서”, 통상산업부 제출, 1996
- [5] Fluent User's Guide, Version 4.3, 1994

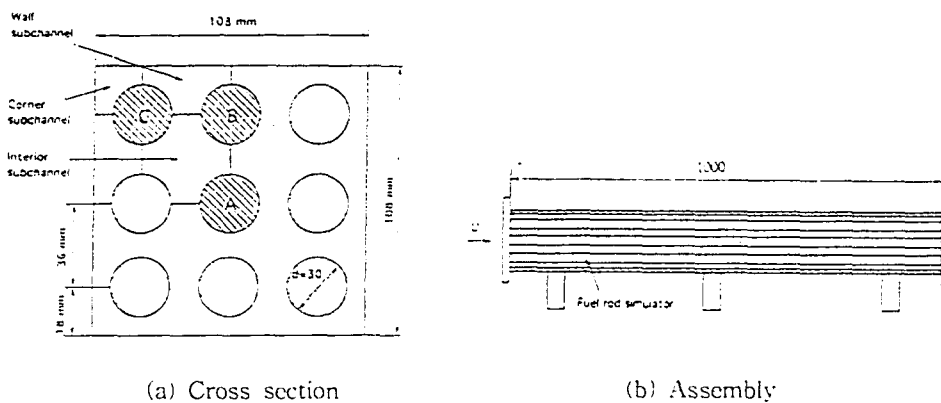


Fig 1. Schematic diagram of 3X3 rod bundle

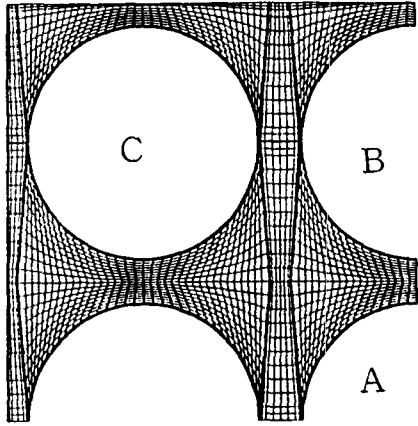


Fig. 2 Computational domain and grid

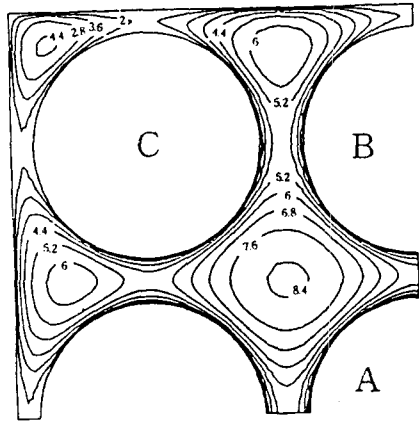


Fig. 3 Velocity contour

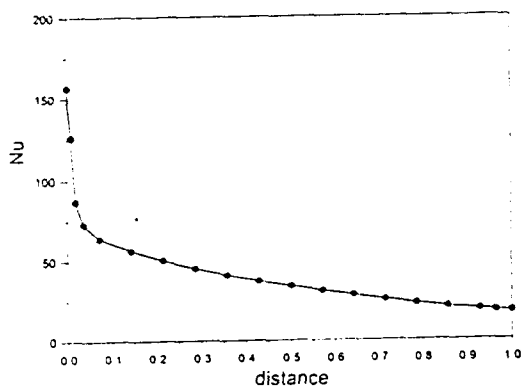
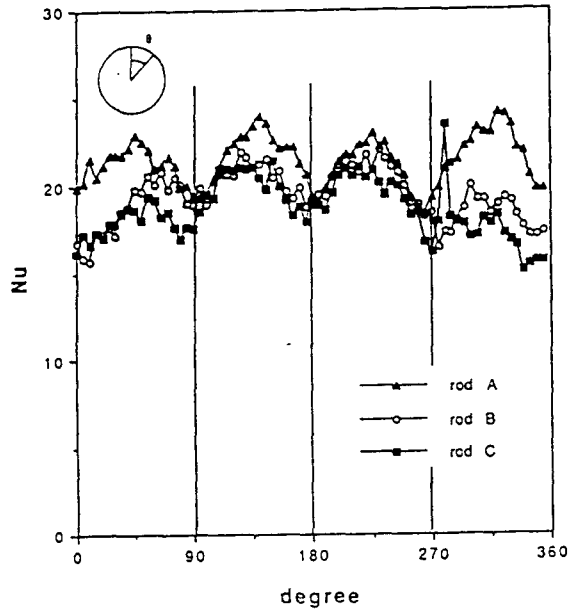
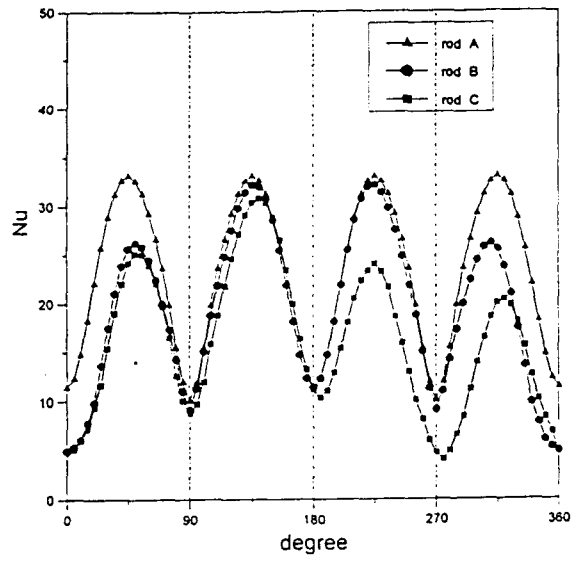


Fig. 4 Average Nu distribution along flow direction for rod A



(a) Experimental result



(b) Numerical result

Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient distribution for rod A, rod B, rod C