'2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온가스로의 열전달 모델 예비 평가

Preliminary Evaluation of Heat Transfer Models for High Temperature Gas Cooled Reactors

이원재, 장종화
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

Wesley Williams
MIT
77 Mass Ave., Cambridge, MA 02139, USA

요 약

고온가스로의 열수력 계통해석을 위하여 요구되는 가스유동에서의 열전달 모델을 평가하였다. 열전달 형태를 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 열전달 영역으로 구분하였으며, 각 열전달 형태를 난류, 층류 및 과도 열전달 모드로 세분하였다. 각 열전달 모드에서 발표된 열전달 모델에 대한 정량, 정성적 평가를 통하여, 고온가스로 해석을 위한 열전달 모델을 예비 선정 하였다.

Abstract

Heat transfer models for gas flows were evaluated, required for the thermal-hydraulic system analysis of high temperature gas cooled reactors. A heat transfer regime was established for the forced convection, mixed convection and natual convection heat transfer regimes, then each regime was divided into turbulent, transition and laminar heat transfer modes. From the qualitative and quantative evaluation of published heat transfer models for each heat transfer mode, we proposed the preliminary heat transfer models for application to high temperature gas cooled reactors analysis.

1. 서론

최근 신형원자로 및 원자력 수소 생산과 관련하여, 고온가스로에 대한 연구가 활성화되고 있다. 고온가스로 유형으로 열중성자를 사용하는 Pebble Bed Modular Reactor (PBMR), Prismatic Modular Reactor (PMR) 및 Very High-Temperature Gas-Cooled Reactor (VHTR)과 고속중성자를 사용하는 Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)이 Near Term Deployment Program (NTDP) 및 Generation-IV 대상원전으로 거론되고 있다. Gen-IV Technical Working Group (TWG)는 PBMR

및 PMR 을 NTDP 대상원전으로 VHTR 및 GFR 을 Generation-IV 원전으로 선정하였으며, 각 원전 유형 별로 기술적인 문제점, 연구.개발 내용 및 기술적 현안 등을 제시한 바 있다. (Gen-IV TWG 2, 2002). 이에 따르면, 비록 상당한 기술 및 경험이 PBMR 및 PMR 분야에는 축적 되어있으나, 최근의 규제환경 및 기술적 발전을 고려할 경우 기존 및 새로운 기술의 개발이 VHTR, GFR 뿐더러 PBMR 및 PMR 에 대하여도 요구됨을 지적하고 있다. 특히, 원전의 안전성 및 성능 입증을 위하여 요구되는 열수력 계통해석 코드 등 방법론 개발의 필요성을 강조하고 있다.

현재 Gen-IV TWG 를 통하여 제안된 고온가스로의 유형은 Helium 또는 초임계 CO2 를 냉각재로 사용한다. 특히, 최근 MIT 에서 제안한 초임계 CO2 Brayton Cycle 은 전력 전환의 효율을 크게 향상시킴으로써 신형원자로의 신개념의 전력변환계통으로 각광을 받고 있다 (Dostal 등, 2002). 따라서, 열수력 계통해석 코드는 정교한 가스 특성의 계산 능력 뿐더러, 압력강하, 열전달 등 열수력 현상의 해석능력을 보유하고 있어야 한다.

이러한 관점에서, 한국원자력연구소는 고온가스로의 계통 열수력 해석체계 개발을 위하여 미국 MIT 와 공동으로 기존의 경수로 및 중수로의 다차원 계통 열수력 해석체계인 MARS 코드에 Helium 및 초임계 CO2 가스특성 해석능력을 보완한 MARS-GCR 코드를 개발한 바 있으며 (이원재 등, 2003), 다음 단계로 고온가스로의 열수력 해석을 위한 열수력 모델의 개선 연구를 수행하고 있다. 본 연구는 이의 일환으로 수행된 가스유동에서의 열전달 모델에 대한 예비 선정, 평가 결과를 기술한다.

2. MARS-GCR 열전달 모델 평가

기존 MARS-GCR 코드는 가압경수로 및 중수로를 대상원전으로 개발된 열수력 계통해석 체계이다. 따라서, 코드의 열수력 모델은 경수로 및 중수로의 출력-냉각 불균형 사고시 발생하는 주요 열수력 현상, 즉, 상변화에 따른 이상유동 열수력 모델 등을 위주로 상세 해석능력을 보유하고 있다. 코드의 열전달 형태는 단상 열전달, 응축 열전달, 핵비등 열전달, 핵비등이탈, 과도열전달 및 액막열전달 형태로 구성되어 있다. 이중, 고온가스로의 해석에 주로 적용되는 모델은 단상 열전달 모델로서, 난류 강제대류 열전달에는 Dittus-Boelter 모델을, 낮은 Reynolds 수 ($Re<10^6$)에 대하여는 코드의 수치적 안정성 확보를 위하여 난류 강제대류, 층류 강제대류 및 자연대류 열전달 계수 중 최대치를 취하도록 단순 모델링되어 있다. 여기서, 층류 강제대류 모델은 Nusselt 상수 모델을, 자연대류 모델은 수직 챈널의 경우 Churchill-Chu 모델을 수평 챈널의 경우 McAdams 모델을 사용한다 (RELAP5 Team, 1995).

그러나, 기존의 Dittus-Boelter 모델은 Helium 및 Air 의 강제대류 열전달을 과예측하며 (Reynolds, 1968), 가스 유동의 경우 유로의 기하학적 형태에 따른 효과 및 벽면 온도효과가 열전달에 지배적인 것으로 알려져 있다. 또한, 가스 유동의 경우 냉각재의 밀도가 경수 및 중수에 비하여 매우 낮으므로 정상상태 조건에서도 Reynolds 수가 상대적으로 매우 낮을뿐

더러, 특히, Post-LOCA 사고 조건에서는 Reynolds 수가 $10^2 \sim 10^5$ 로서 열전달 모드는 자연대류, 혼합대류, 층류 또는 난류 강제대류 등 기존 경수로 및 중수로의 경우와는 상이한 열전달 영역에 존재하게 된다. 따라서, 기존 MARS-GCR 코드의 단순화된 열전달 모델로는 고온가스로의 정상 및 과도상태시 발생하는 주요 열수력 현상을 정확하게 모의할 수 없으므로, MARS-GCR 코드를 고온가스로의 해석에 적용하기 위하여는 열전달 모델의 개선이 요구된다.

3. 고온가스로의 열전달 모델 평가

3-1. 열전달 형태

낮은 Reynolds 수를 갖는 단상유동에서의 열전달 현상은 압력강하에 의한 강제대류 및 벽면온도 효과에 따른 자연대류 등 외부적인 인자 및 중력효과 및 부력 등 다양한 내부적인 인자 에 의하여 지배를 받는다. 따라서, 과거 상당한 실험적, 이론적 연구가 수행되었음에도 불구하고, 현상학적인 복잡성으로 아직도 종합적이고 실용적인 열전달 형태가 명확히 정의되지는 않은 상태이다.

Metais 와 Eckert (Metais 등, 1968)는 1964 년 까지 종합된 균일 열속조건 및 균일 벽면온도 조건에서 생산된 실험자료를 토대로, 수직챈널 단상유동 조건에서의 열전달 형태를 그림 1 과 같이 제안하였다.

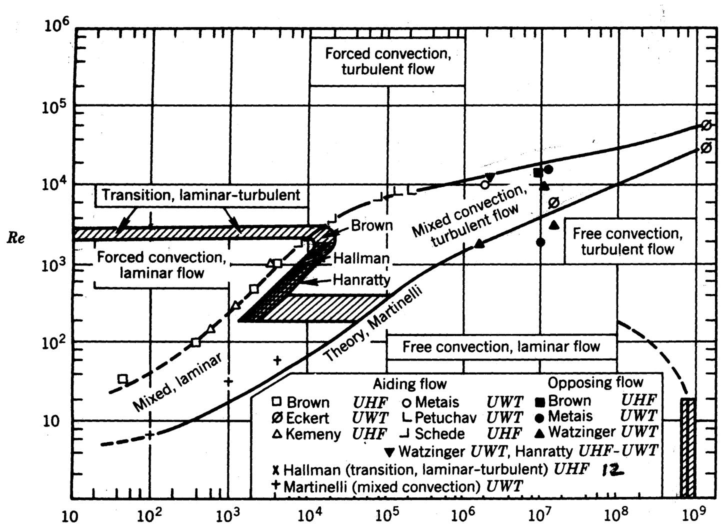

그림 1 수직챈널에서의 단상유동 열전달 형태 (Metais, et.al, 1964)

Metais 와 Eckert 는 열전달 형태를 크게 3 개, 즉 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 형태로 구분하였으며, 각 형태를 난류, 층류 및 과도 영역으로 세분하였다. 열전달을 지배하는 주요 변수로 Y-축으로는 Reynolds 수(*Re*)와 X-축 변수로는 Grashof 수(Gr)에 Prandtl 수(Pr)와 유

로형태에 따른 효과인 D/L 을 곱한 변수인 $Gr \times Pr \times D/L$ 을 선정하여 열전달 형태를 구분하였다. 여기서, Y-축의 Reynolds 수는 유동의 관성력($\rho D\upsilon$)과 점성력(μ)의 비로, 층류 및 난류 유동을 구분하는 주요 변수이다. X-축 변수인 $Gr \times Pr \times D/L$ 은 부력효과, 유체의 열역학적 특성효과 및 유로의 기하학적 형태 효과를 종합적으로 기술하는 변수로 정의되었다. 여기서, Grashof 수는 부력($\rho^2 g\beta(T_w-T_b)L^3$)과 점성력($\mu^3$)의 비로서, 부력효과에 의한 자연대류, 혼합대류 및 강제대류 유동을 구분하는 주요 인자이다. Prandtl 수는 운동량 확산계수(μ/ρ)와 열확산계수($\kappa/(\rho Cp)$)의 비로서 유체의 열역학적 특성에 따른 효과를 기술하며, D/L 은 유로 직경(D)과 길이(L)의 비로서 유로의 기하학적 형태에 따른 효과를 기술한다 (여기서, $Gr \times Pr$ 은 Reyleigh 수, Ra, 로도 정의된다).

Metais 와 Eckert 의 열전달 형태 모델은 D/L 이 0.01 이상이고, Prandtl 수가 1 이상인 조건에서 개발되었으나, 이후의 평가자료에 따르면 D/L 효과는 무시할 만하며, Liquid Metal 과 같이 Prandtl 수가 1 보다 매우 작은 경우를 제외하고는 거의 모든 열전달 조건에 대하여 Metais 와 Eckert 의 모델은 수정없이 적용 가능한 것으로 평가되었다 (Kakac 등, 1987).

그림 1 에 제시된 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 간의 천이기준은 정성적인 값으로서, 천이기준의 정량적인 모델은 Aicher (1997), Burmeister (1993) 및 Tanaka (1987) 등에 의하여 제안된 바 있다. 표 1 에는 제안된 천이기준을 기술하였으며, Aicher 등은 천이기준으로 Grashof 수, Reynolds 수 및 Prandtl 수의 조합을, Tanaka 등은 Grashof 수와 Reynolds 수의 조합을 사용하였다. Burmeister 는 이론적인 부력과 관성력의 비로서 혼합대류와 자연대류 간의 천이기준을 제시하였다. 상기모델 외에도, Buoyancy Number ($Bo = 8x10^4 Gr/(Re^{3.425} Pr^{0.8})$)를 사용하는 천이기준이 있으나, 이에 대한 평가는 향후 이루어질 예정이다.

표 1 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 간의 천이기준 비교

천이기준	강제대류	혼합대류	자연대류
Aicher 등	$Ra^{1/3}/(Re^{0.8}Pr^{0.4})<0.05$	$0.05<Ra^{1/3}/(Re^{0.8}Pr^{0.4})<0.2$	$Ra^{1/3}/(Re^{0.8}Pr^{0.4} >0.2$
Tanaka 등	$Re>50Gr^{8/21}$	$16.5Gr^{8/21}<\mathrm{Re}<50Gr^{8/21}$	$\mathrm{Re}<16.5Gr^{8/21}$
Burmeister 등	$Gr<Re^2$		$Gr>Re^2$

그림 2 는 Prandtl 수 0.7 인 유체에 대하여 각 천이기준을 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 각 개발자에 따라 서로 다른 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다. 현재 천이기준과 관련하여 충분한 Database 가 구축되있지 않아 각 천이기준의 선정에 대한 평가기준의 설정에 어려움이 있으나, 본 연구에서는 정성적으로 최신 개발된 모델과 Metais 와 Eckert 의 모델에 근사한 모델을 기준으로 하여 천이기준을 선정하였다. 선정된 천이기준은 강제대류에서 혼합대류로의 천이는 Aicher 등의 모델을, 혼합대류에서 자연대류로의 천이는 Burmeister 모델로 선정하였다. 특히, Burmeister 모델은 낮은 Rayleigh 수에서, 즉 층류 혼합대류에서 자연대류의 천이기준이 Metais 와 Eckert 의 모델에 근사하며, 난류 혼합대류에서 자연대류로의 천이기준은 Aicher 등의 모델에 근사함을 알 수 있다.

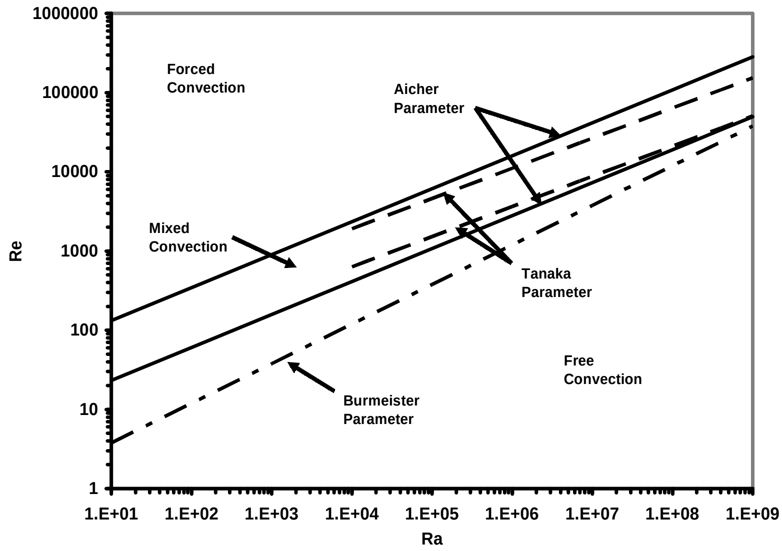

그림 2 열전달 형태의 천이기준 비교 (Pr = 0.7)

그림 3 은 최종적으로 선정된 열전달 형태로서, 선정된 천이기준에 따라 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 열전달 영역으로 구분하였다. 각 열전달 형태는 Metais 와 Eckert 의 모델에 따라 층류, 난류 및 과도 열전달 모드로 세분하였다. 그러나, 층류에서 난류유동으로의 천이기준에 대한 정량적 모델의 부재로 각 열전달 형태 별로 천이기준을 설정, 적용하였으며, 이는 열전달 모델의 선정 평가에서 상세히 기술한다. 그림에는 실제적인 고속가스로의 Post-LOCA 잔열제거계통 운전 시 노심 및 냉각기에서의 열수력 조건을 Helium 및 CO2 냉각재에 대하여 참고로 예시하였다 (Williams 등, 2002).

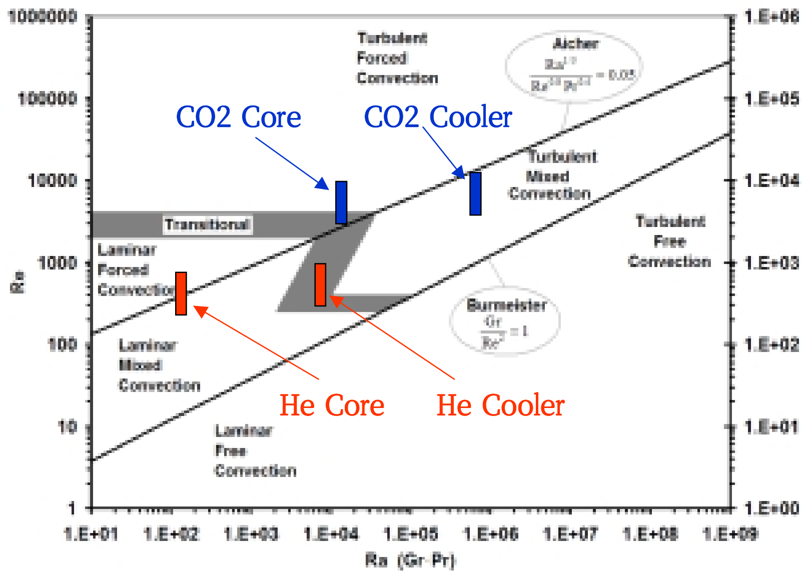

그림 3 선정된 단상유동 수직챈널에서의 열전달 형태 모델

3-2 강제대류 열전달 모델

2 절에서 기술한 바와 같이 가스유동에서 기존의 난류 강제대류 열전달 모델의 취약점을 보완하기 위하여, 3 종의 열전달 모델을 수집, 평가하였다. 식 1 은 Reynolds(1968)에 의하여 제안된 상수를 0.021 로 수정한 Dittus-Boelter 모델로서, Reynolds 수>10^6 범위에서 적용 가능하다. 식 2 는 Gnielinski(1975)가 제안한 모델로 유로형태 및 벽면 온도효과를 고려한 모델이다. 식 3 은 Olson (2000) 모델로서 Gnielinski 모델과 유사한 모델이나, 벽면 마찰모델로서 Karman-Nikuradse 모델을 사용하며 벽면 온도효과에 벽면온도 뿐더러 계통 압력효과를 고려한 모델이다. 특히, Olson 모델은 균일열속 및 균일 벽면온도 조건에서, 일반적인 가스유동 뿐더러 초임계 유동에 대하여 그 적용성을 입증한 모델이다 (Olson, 2000). Gnielinski 및 Olson 모델의 적용범위는 2,300<Reynolds 수<5x10^6 및 0.5< Prandtl 수<2,000 에서 적용 가능하다.

$$Nu = 0.021\, Re^{0.8}\, Pr^{0.4} \tag{1}$$

$$Nu = \frac{(\xi/8)(\mathrm{Re}-1000)\,\mathrm{Pr}}{1+12.7\sqrt{\xi/8}(\mathrm{Pr}^{2/3}-1)}\left[1+(d/L)^{2/3}\right]K \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
&\textit{where}\\
&K=(\mathrm{Pr}/\mathrm{Pr}_w)^{0.11}\ \ \textit{for liquid},\ 0.05<\mathrm{Pr}/\mathrm{Pr}_w<20\\
&K=(T_b/T_w)^{0.45}\ \ \textit{for gas},\ 0.5<T_b/T_w<1.5\\
&\xi=(1.82\log_{10}(\mathrm{Re})-1.64)^{-2}
\end{aligned}$$

$$Nu = \frac{(f/2)(\mathrm{Re}-1000)\,\mathrm{Pr}}{1+12.7\sqrt{f/2}(\mathrm{Pr}^{2/3}-1)}\left[1+(d/L)^{2/3}\right]K \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
&\textit{where}\\
&\frac{1}{\sqrt{f}}=4.0\log_{10}(\mathrm{Re}\cdot\sqrt{f})-0.4: \qquad \textit{Karman}-\textit{Nikuradse}\\
&K=\left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.3}\left(\frac{\overline{C_p}}{C_{p,b}}\right)^{n}\\
&\quad\overline{C_p}=\frac{h_w-h_b}{T_w-T_b}\\
&\quad \textit{if}\ T_w/T_m<1.0\ \textit{or}\ T_b/T_m\ge 1.2, \qquad n=0.4\\
&\quad \textit{if}\ T_b/T_m<1.0\le T_w/T_m, \qquad n=0.4+0.18\left(\frac{T_w}{T_m}-1\right)\\
&\quad \textit{if}\ T_w/T_m\ge 1.0\ \textit{and}\ 1.0<T_b/T_m<1.2, \quad n=0.4+0.18\left(\frac{T_w}{T_m}-1\right)\left[1-5\left(\frac{T_b}{T_m}-1\right)\right]
\end{aligned}$$

수집된 모델의 고온가스로 적용성 평가를 위하여, CO2 유동의 다양한 열전달 조건에서 (1 기압<계통압력<190 기압, 계통온도=800 K, 400 K<벽면온도<1200 K, 5 m/s<입구유속<15

m/s), 각 모델의 예측능력을 정량적으로 평가하였다. 그림 4 에는 벽면 온도효과가 없을 경우, 수정된 Dittus-Boelter 및 Gnielinski 모델에 의한 열전달계수와 Olson 모델에 의한 열전달계수의 상대적인 차이를 도시하였다. Reynolds 수가 4,000 이상에서는 벽면효과가 없을 경우 모든 모델이 거의 동일한 열전달계수를 계산함을 알 수 있다. 그러나, Reynolds 수가 4,000 이하에서는 수정된 Dittus-Boelter 모델은 Olson 모델에 의한 결과를 ~30% 과예측 한다. Gnielinki 및 Olson 모델은 낮은 Reynolds 수에서도 열전달계수를 ~6% 오차 범위 내에서 계산하며, 이러한 차이는 상이한 마찰계수 모델의 사용에 기인한 것으로 분석된다.

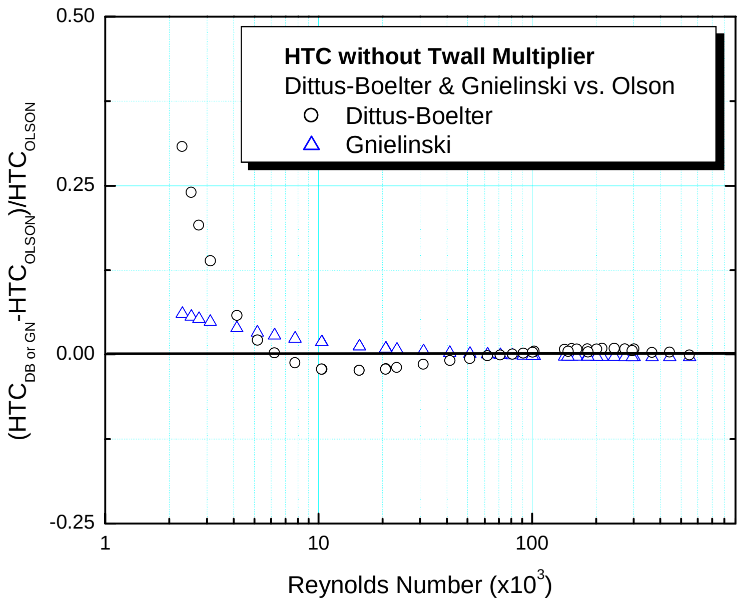

그림 4 모델 별 열전달계수 비교 – 벽면 온도효과 부재

그림 5 와 6 은 벽면 온도효과가 존재할 경우, 수정된 Dittus-Boelter 모델과 Gnielinski 모델에 의한 열전달계수를 각각 Olson 모델의 결과와 비교, 평가한 결과이다. 그림 5 에서 보듯이, 난류 강제대류 조건에서 벽면 온도효과는 가열의 경우에는 열전달을 최대 ~45% 저하시키며, 냉각의 경우에는 열전달을 최대 ~29% 향상시키는 효과가 있다. 따라서, 벽면 온도효과는 가스유동의 난류 강제대류 열전달에 매우 큰 영향을 주므로, 벽면 온도효과를 고려하지 않는 Dittus-Boelter 모델은 고온가스로 해석에 대하여 적합하지 않은 것으로 평가된다. 그림 6 에서 보듯이 Gnielinski 모델 또한 Olson 모델의 결과와 비교 -7~22%의 오차를 갖으며, 오차는 계통의 압력이 낮아질수록 증가함을 알 수 있다. 이는 Gnielinski 모델의 경우, 벽면온도 효과 고려시 계통압력 효과를 고려하지 않아 발생하는 차이로 평가된다.

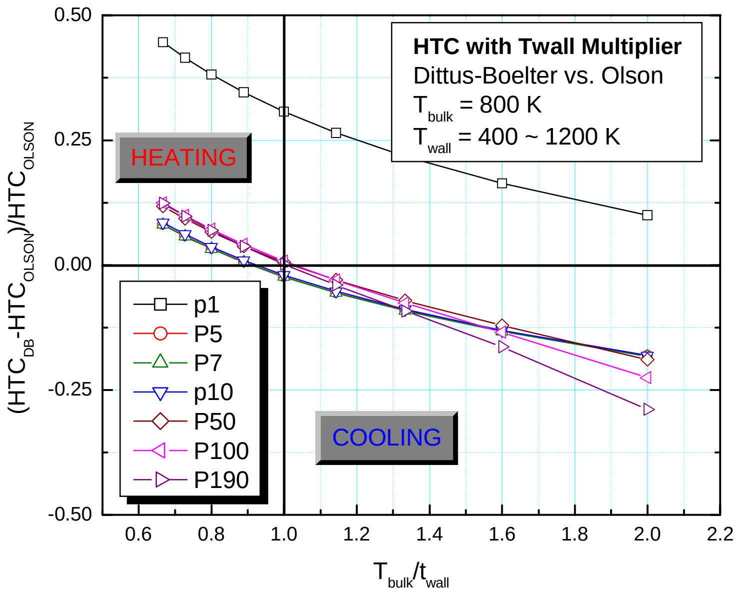

그림 5 Dittus-Boelter 와 Olson 모델의 열전달계수 비교 – 벽면 온도효과

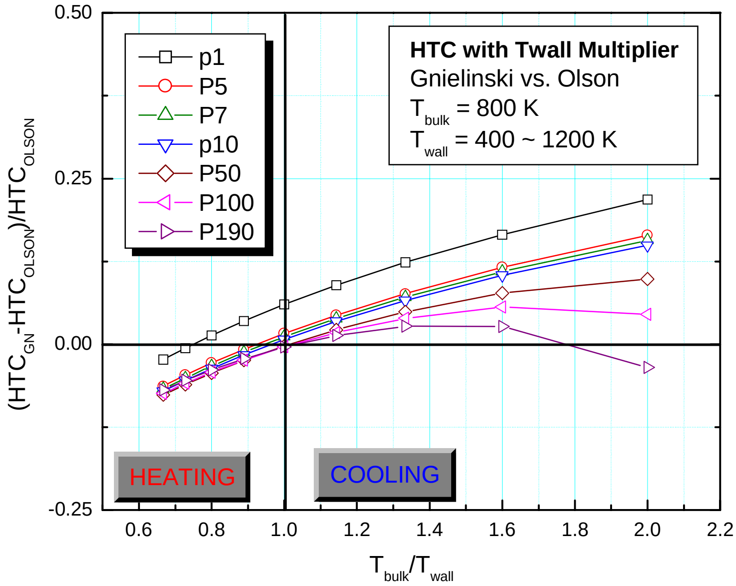

그림 6 Gnielinski 와 Olson 모델의 열전달계수 비교 – 벽면 온도효과

실제 고온가스로 계통의 노심 및 냉각기 등에서 존재하는 상당량의 벽면온도 차이를 고려할 때, 난류 강제대류 열전달 모델에 벽면온도 효과의 적절한 반영은 고온가스로의 해석에 필수적인 것으로 평가된다. 또한, 다양한 계통온도 및 압력 조건에서의 계통 과도거동 해석을 위하여는 계통의 열역학적 조건을 반영한 벽면온도 효과 모델이 요구될 것으로 판단된다. 따라서, 고온가스로의 난류 강제대류 열전달 모델로 Olson 모델을 가장 적합한 모델로 선정하였다.

층류 강제대류 유동의 경우, 노심에는 균일 열속조건에서는 이론적으로 유도된 층류 열전달 모델인 $Nu = 4.364$ 를, 냉각기의 경우에는 균일 벽면온도 조건에 대한 모델인 $Nu = 3.657$ 을 선정하였다.

층류로부터 난류유동으로의 천이는, Olson 모델의 적용범위의 하한치인 Reynolds 수 2,300 를 기준으로, 이 이하에서는 층류 열전달 모델을, 이 이상으로부터 5,000 영역에서는 난류 열전달계수와 층류 열전달계수의 내삽치를, 그리고 5,000 이상에서는 난류모델을 적용하는 것이 타당한 것으로 평가되었다. Aicher (1997)는 Reynolds 수 $< 10^4$ 영역에 대하여 난류모델의 적용을 권고하였으나, 그림 4 의 모델 평가결과에 근거하여, 검증된 Olson 모델의 적용범위를 최대한 활용하기 위하여 천이기준으로 Reynolds 수 5,000 을 선정하였다.

3-3 자연대류 열전달 모델

자연대류 열전달은 부력에 의한 영향이 지배하는 영역으로, 아직도 실험적, 이론적 연구에 근거한 열전달 모델의 개선 및 개발이 요구되는 분야이다. 특히, 층류에서 난류 자연대류로의 천이는 부력의 영향을 받으므로, 신뢰도 있는 정량화된 기준이 부재하다.

Churchill 과 Chu (1975)는 수직 판유동에서의 자연대류 열전달 모델로 아래의 모델을 개발하였다.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (Ra)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{\Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \qquad (4)$$

본 모델은 층류 및 난류 자연대류 등 모든 영역에서 열전달 계수의 예측능력을 보유한 것으로 알려져 있으므로 (RELAP5 Team, 1995), 본 연구에서는 별도의 평가 없이 상기 모델을 자연대류 형태에서 층류, 난류 및 과도 열전달 영역을 포괄하는 단일 열수력 모델로 선정하였다.

3-4 혼합대류 열전달 모델

혼합대류 열전달 형태는 강제대류와 자연대류가 혼합되어 열전달이 이루어지는 형태로, 현상학적인 복잡성 뿐더러 실험적 Database 의 취약성으로 고온가스로 해석을 위한 열수력 모델의 개선에 어려움이 가장 큰 분야로 구분된다.

수직챈널 유동의 경우, 혼합대류 열전달 특성은 벽면 온도에 의한 부력의 작용방향이 강

제유동 방향과 동방향이냐 혹은 역방향이냐에 따라 영향을 받는다. 그림 7 에는 난류 혼합 유동에서의 열전달 특성 메카니즘을 제시하고 있다. 난류유동에서 동방향 유동의 경우, 온도효과는 벽면 근처에서의 유속을 가속하나 동시에 질량 보존을 위하여 유로 중앙의 유속이 감소하게 되므로 전체적인 열전달계수는 감소하는 것을 보여주고 있다. 반면에 역방향 난류유동의 경우, 온도효과는 벽면 근처의 유속을 감소시켜 유로 중앙의 유속을 증가시키게 되므로 전체적인 열전달계수는 증가하게 된다. 이와 비교하여, 난류 자연대류 유동형태에서, 동방향 유동시 열전달 계수의 증가 메커니즘을 보여준다.

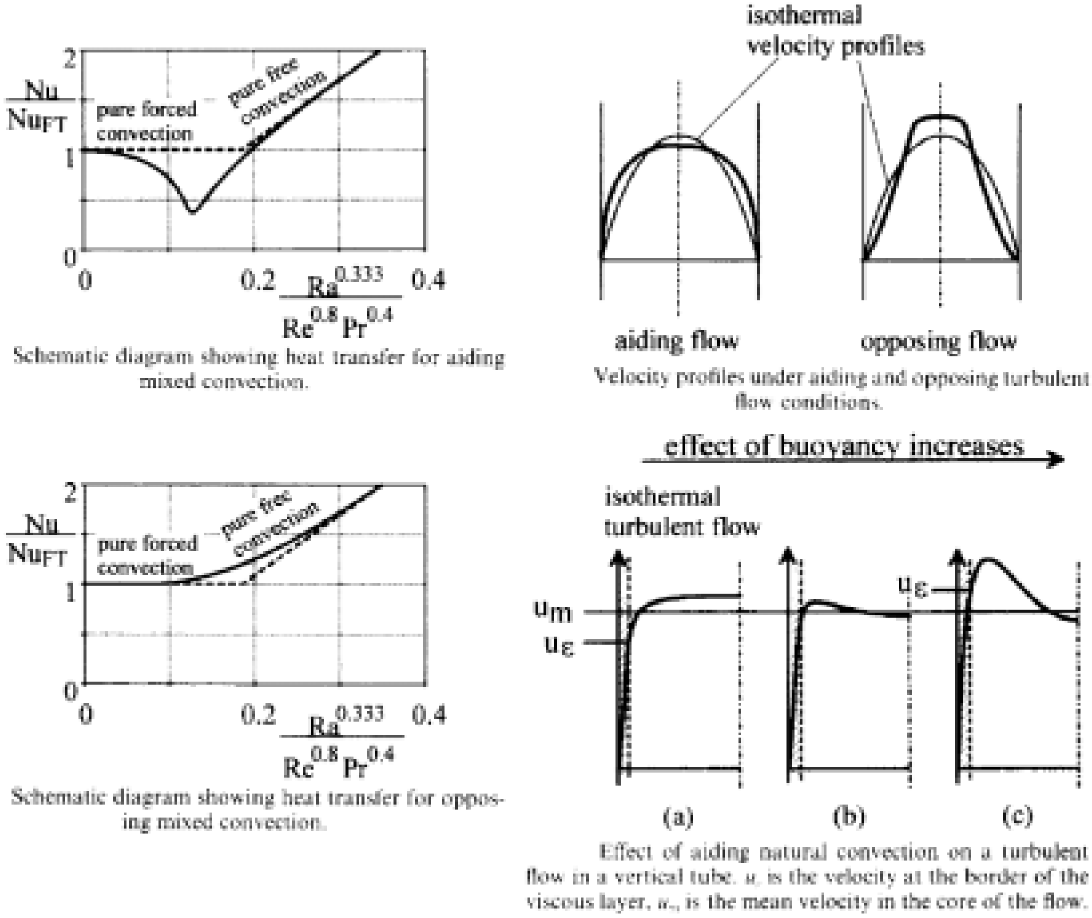

그림 7 난류 혼합대류 열전달 특성 (Aicher, et. al, 1997)

층류 혼합대류 열전달의 경우, 수직챈널에서 동방향 유동 시 벽면온도 효과에 의한 벽면에서의 유속 증가는 유로 내의 유속분포를 난류유동 형태로 변형시켜 궁극적으로는 전체 유속의 증가를 초래하게 되므로, 난류 혼합유동과는 반대로 열전달계수가 증가한다. 이와 같이, 수직챈널에서의 혼합대류 동방향 유동의 경우, 열전달 계수는 벽면 온도효과의 증가에 따라, 즉 강제대류에서 자연대류 방향으로 천이됨에따라, 열전달계수가 감소하였다 다시 증가하게 된다. 이러한 열전달 저하는 노심 출력 증가 또는 과도 조건에서 유동 불안정

성을 유발할 가능성이 높다. 따라서, 혼합유동 열전달 모델의 정확한 모의는 고온가스로의 안전성 입증에 중요하다.

혼합유동의 열전달 모델은 Hallman (1961), Jackson (1989) 등, Herbert (1972) 등에 의하여 상세 모델이 제시된 바 있다. 그러나, 실제 해석체계에 적용을 위하여는 보다 단순화된 모델을 사용할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 아래와 같이 Churchill (1998)이 제안한 모델을 예비 모델로 선정하였다.

층류 혼합유동의 경우, 균일 열속조건에서,

$$Nu = \sqrt[6]{Nu_{FL}^{6} + Nu_{NL}^{6}}\text{, 여기서, } Nu_{FL} = 4.364,\ Nu_{NL} \text{은 식 4} \tag{5}$$

균일 벽면온도 조건에서,

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{FL}^{3} + Nu_{NL}^{3}}\text{, 여기서, } Nu_{FL} = 3.657,\ Nu_{NL} \text{은 식 4} \tag{6}$$

난류 혼합유동의 경우,

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{FT}^{3} - Nu_{NT}^{3}}\text{, 여기서, } Nu_{FT} \text{ 는 식 3, } Nu_{NT} \text{은 식 4} \tag{7}$$

혼합유동에서 층류로부터 난류유동으로의 천이는 정량화된 천이기준이 없으므로, 열전달 저하 관점에서 보수적으로 층류 및 난류 열전달 계수의 최소치를 택하도록 선정하였다. 본 연구를 통하여 선정된 혼합유동 모델은 수직챈널 동방향 유동에 대한 예비 모델로서, 향후 실험 Database 등을 이용한 상세평가가 이루어져 그 적용성 여부가 판단되어야 할 것이다. 또한, 역방향 유동의 모델은 향후 보완되어야 할 것이다.

4. 결론 및 향후계획

고온가스로의 열수력 계통해석을 위하여 요구되는, 가스유동에서의 열전달 모델을 예비 평가하였다. 열전달 형태는 Metais 와 Eckert 의 모델을 기준으로 하여 강제대류, 혼합대류 및 자연대류 열전달 영역으로 구분하였으며, 강제대류-혼합대류 천이기준으로는 Aicher 의 모델을 혼합대류-자연대류 천이기준으로는 Burmeister 모델을 선정하였다. 정의된 각 열전달 형태를 난류, 층류 및 과도 열전달 모드로 세분하여, 각 열전달 모드에서 발표된 열전달 모델에 대한 정량, 정성적 평가를 통하여 고온가스로 해석을 위한 열전달 모델을 제안하였다. 균일 열속 및 균일 벽면온도 조건에 대하여, 난류 강제대류 모델로는 Olson 모델을 (식 3), 층류 강제대류 모델은 Nusselt 수에 대한 이론적 상관식을, 난류 및 층류 자연대류 모델로는 Churchill-Chu 모델을 (식 4), 난류 및 층류 혼합유동 모델로는 Churchill 이 제안한 모델을 (실 5, 6, 7) 선정하였다.

본 연구를 통하여 제안된 열전달 모델은 수직챈널에서의 가스유동에 적용 가능할 것으로 평가되나, 향후 실험 Database 등을 통한 상세 평가를 통하여 그 적용성 여부 및 불확

실도가 정량화되어야 할 것이다. 특히, 열전달 형태 및 난류/층류 유동으로의 천이기준과 관련한 모델, 그리고, 혼합유동에서의 동방향 및 역방향 유동에 대한 열전달 모델 등은 추가적인 실험적, 이론적 연구를 통하여 보완되어야 할 것이다. 결론적으로, 본 연구를 통하여 고온가스로의 열수력 계통해석을 위한 예비 열수력 모델이 선정, 평가되었다. 향후 계획으로, 이들을 MARS-GCR 코드에 보완하여 실험 결과에 대한 평가계산을 수행함으로써 관련 모델의 불확실도를 정량화하고, 과도상태에서 열전달 모드 천이 시의 수치적 안정성 등에 대한 평가를 통하여 최종적인 열전달 모델을 선정할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과기부의 인력양성사업의 일환으로 미국 MIT 와 공동으로 수행되었다.

참고문헌

Aicher, T. and Martin, H., “New Correlations for Mixed Turbulent Natural and Forced Convection Heat Transfer in Vertical Tubes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 15, pp. 3617-3626, 1997

Burnmeister, L.C., Convective Heat Transfer, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 1993

Churchill, S.W., “2.5.10 Combined free and forced convection in channels,” Heat Exchanger Design Handbook, ed. Hewitt, G.F., Begell House, Inc., 1998.

Churchill, S.W. and Chu, H.H.S., “Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection From a Vertical Plate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer, 18*. 1975, pp.1323-1329.

Dostal, V., Hejzlar, P., Driscoll, M.J. and Todreas, N.E., “A Supercritical CO2 Gas Turbine Power Cycle for Next-Generation Nuclear Reactors”, ICONE10, *10th International Conference on Nuclear Engineering*, April 14-18, 2002, Arlington, VA, USA

Gen-IV Technical Working Group 2, *R&D Scope Report*, Generation IV Nuclear Energy Systems Roadmap Technical Working Group 2 – Gas-Cooled Reactor System Concepts, 2002

Gnielinski, V., “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow,” *International Chemical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 359-368, 1976.

Hallman, T.M., “Experimental study of combined forced and free convection in a vertical tube,” NASA TN D-1104, December, 1961.

Herbert, L.S. and Sterns, U.J., “Heat transfer in vertical tubes—Interaction of forced and free convection,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 4, pp. 46-52, 1972.

Jackson, J.D., Cotton, M.A. and Axcell, B.P., “Studies of mixed convection in vertical tubes,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 10, No. 1, 1989.

Kakac, S., Shah, R. and Aung, W., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 1987

Lee, W.J., et.al, “Development of MARS-GCR for Gas Cooled Reactor Analysis – Implementation of Gas Properties”, NURETH-10, *The Tenth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, October 5-11, 2003, Seoul, Korea

Metais, B. and Eckert, E.R.G., “Forced, mixed and free convection regimes,” *Journal of Heat Transfer*, pp. 295-296, May 1964

Olson D.A.,. “Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide Flowing in a Cooled Horizontal Tube,” National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6496, May 2000

RELAP5 Code Development Team, “RELAP5/MOD3 Code Manual”, NUREG/CR-5535, INEL, USNRC, 1995

Reynolds, H.C., Jr., “Internal Flow Reynolds Number Turbulent Heat Transfer”, University of Arizona, EMMT Lab TR 2, Jan., 1968

Tanaka, H., Maruyama, S. and Hatano, S., “Combined Forced and Natural Convection Heat Transfer for Upward Flow in a Uniformly Heated, Vertical Pipe”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 1, pp 165-174, 1987

Williams, W., et.al, “Analysis of a Convection Loop for GFR Post-LOCA Decay Heat Removal from a Block-Type Core”, MIT-ANP-TR-095, MIT, Mar., 2003