

원자력 발전소의 붕산희석 현상 해석 방안 연구

A Study on the Boron Dilution Phenomenon in Nuclear Power Plant

김 대웅*, 이 도환, 김 양석, 김 인환 (한전 전력연구원), 유 성연 (충남대학교)

요 약

붕산희석사고는 원자력발전소에서 발생 가능한 중대사고중 하나로 최근 전세계적으로 활발하게 다루어지고 있으나, 붕산농도 측정의 어려움으로 인해 실험적인 연구보다는 전산해석을 통한 연구가 활발한 실정이다. 본 연구의 목적은 원자로용기내의 붕산희석 현상에 대해 붕산농도를 측정하지 않고 유체의 온도를 측정하여 붕산농도를 추정할수 있는 간접적 실험 방안을 제시하고 그 적용성을 알아보는데 있다. 해석방법은 범용 열유체 전산해석 코드인 FLUENT를 이용하여 원자로 용기 환형공간에서의 열전달 모델 및 물질전달 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 상호 비교하여 붕산희석 현상에서 두 모델사이에 유사성이 있음을 확인하였다.

Abstract

Boron dilution phenomenon in the nuclear reactor is very important problem in connection with reactor safety. But only a few experimental studies are performed because of the difficulties in the measurement of boron concentration. The purpose of this study is to examine the heat/mass transfer analogy in the situation of boron dilution and to suggest indirect measurement technique in estimating boron concentration. Two model, one is heat transfer model and the other is mass transfer model is analyzed numerically using FLUENT. Temperature and concentration distributions for the nuclear reactor annulus are compared, respectively, to examine the heat/mass transfer analogy. Quite good agreements are found to be seen between two transport phenomena.

1. 서론

원자력발전소의 다른 대부분의 사고가 열전달 현상과 관련되어 있는 반면에 붕산희석 사고는 원자로용기내 붕산의 물질전달 현상 규명이 주요 관심 대상이 되고 있다. 붕산은 가압 경수로형 원자로 노심에 물과 함께 혼합되어 일정농도의 붕산수로 채워져 있으며, 핵연료에서 발생하는 열을 제거하고 노심의 반응을 억제하는 기능을 가지고 있다. 만약 사고로 인하여 붕산이 함유되지 않은 비붕산수가 원자로 노심으로 유입되어 붕산수 농도를 묽게하는 희석 사고가 발생하면 원자로내 핵연료는 과잉반응을 하여 노심의 출력이 상승하게 되고, 핵연료의 반응을 제어하기가 어렵게 되며, 심한 경우 핵연료봉의 온도가 점점 상승하게 되어 핵연료가 용융되는 심각한 사고로 발전될 수 있는데 이것을 붕산희석 사고라 한다.

붕산 희석사고의 유형은 다양하게 나타날 수 있으며, 크게 나누어 자연 대류현상에 의한 느린 붕산 희석사고와 원자로냉각재 펌프등의 기동에 의한 급속 붕산 희석 사고가 있다. 현재까지 알려진 바로는 두 가지 사고 유형중 급속 붕산희석 사고가 더 심각한 상황을 초래할 수 있는 것으로 알려져 있다. 국내·외의 원자력 사업 관련자들은 붕산희석 사고의 발생을 방지하기 위하여 사고 유형에 대한 파악과 사고시 원자로 용기내에서의 붕산수 거동에 대한 다양한 연구를 수행해 왔다. 하지만

현재까지 수행된 많은 연구가 전산 프로그램을 활용한 해석적 연구에 집중되어 있으며, 실험에 의한 연구는 미비한 실정이다. 이것은 봉산의 물리적, 화학적 특성에 의해 실험에서 봉산수를 사용할 경우 봉산의 농도를 직접 측정하기가 어려운것이 큰 이유중의 하나이다. 스웨덴에서 수행된 봉산희석 실험에서는 봉산수 대신에 비교적 측정이 용이한 소금물을 봉산수 대신 사용하여 소금물의 전기 전도도를 측정한 후 봉산수와 소금물사이의 농도 상관식을 이용하여 봉산수의 농도를 도출하는 간접 측정방법이 사용되었다.

본 연구에서는 원자로 용기내 봉산농도 분포 해석을 보다 쉽게 할 수 있는 간접 실험방안의 하나로 열전달과 물질전달의 유사성을 이용한 방법을 제시하고, 전산해석을 수행하여 그 적용성을 확인하는데 목적이 있다. 즉 이미 알려진 열전달과 물질전달의 유사성이 봉산희석 해석에도 적용될 수 있음을 전산해석을 통한 해석적 방법으로 확인하여 봉산농도 측정에 봉산수나 소금물과 같은 물질의 농도를 직접 측정하는 것 보다 상대적으로 측정하기 쉬운 온도를 측정하여 실험을 수행할 수 있는 방안을 제시하기 위해 본 연구가 수행되었다. 본 해석에서는 원자로냉각재 펌프 기동을 가정한 급속 봉산희석 사고를 해석 모델로 선정하였다.

2 열전달 및 물질전달의 유사성

만약 두 개 혹은 그 이상의 공정(현상)이 같은 형식의 무차원식에 의해 지배되면 그 공정은 유사성이 있다고 말한다. 열전달과 물질전달의 미분방정식은 동일한 형식의 대류 및 확산항의 조합으로 이루어져 있으며, 다양한 분야에서 유사성이 확인되어지고 또한 응용되고 있다. 물질전달과 열전달의 유사성은 열전달과 유체마찰의 유사성과 함께 오래 전부터 알려져 왔으나 이 유사성을 열전달계수 측정에 이용한 것은 1921년 Thoma가 처음이다. 그 후로 이종가스 분사추출법, 전기화학법, 나프탈렌승화법 등 여러 가지 물질전달실험이 개발되었다. 비압축성 유체의 전달현상을 나타내는 에너지 및 물질농도방정식의 무차원화 식은 다음과 같다.

- 에너지방정식(열전달)

$$\frac{DT}{Dx} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Pr}{Pr_j} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

- 물질농도방정식(물질전달)

$$\frac{DW}{Dx} = \frac{1}{ReSc} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Sc}{Sc_j} \right) \frac{\partial W}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

에너지방정식에서 얻어진 온도분포와 물질농도 방정식에서 얻어진 농도분포는 열 경계조건과 물질농도 경계조건이 같고, 난류 Prandtl수와 난류 Schmidt수가 같거나 ($Pr_j = Sc_j$), 층류유동인 경우에는 Prandtl수와 Schmidt수를 서로 바꾸면 동일하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 강제대류열전달에서 열전달계수를 구하는 실험식은 다음과 같은 형태로 주어진다.

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

강제대류 물질전달에서 물질전달계수를 구하는 실험식은 Prandtl 수를 Schmidt 수로 바꾸어 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

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

$$Nu/Sh = (h d/k)/(h_m d/D) = (Pr/Sc)^n \quad (5)$$

3. 지배방정식 및 전산해석 기법

3.1 지배방정식

본 연구에서는 범용 유체유동 해석 코드인 FLUENT를 사용하여 3차원 원자로용기 환형공간에 대한 열전달 및 물질전달 모델의 비정상 상태 해석을 수행하였다.

○ 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

○ 운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho \epsilon_i \mu_i \right] \quad (7)$$

○ 에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - u_j \beta \right] + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} \quad (8)$$

○ 화학종방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} J_j + R_j + S_j \quad (9)$$

화학종방정식 (9)에서 R_j 는 화학반응에 의해 생성 또는 소멸되는 각 화학종의 질량이며, S_j 는 소산 단계에서 추가되는 물질에 대한 생성율을 나타낸다. J_j 는 diffusion flux이며, 난류유동에서 특정 화학종의 diffusion flux는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_j = -(\rho D_{i,j} + \frac{\mu_i}{Sc_i}) \frac{\partial m_j}{\partial x_j} \quad (10)$$

여기에서 $D_{i,j}$ 는 binary-mass-diffusion-co-efficient (BDC)로 정의되며, 두 종류 이상의 물질이 존재하는 물질전달 해석에서 물질전달 방정식을 풀기 위해서는 물질확산계수 (mass diffusion coefficient)가 요구되어지며, 그 값은 온도와 농도에 따라 달라진다.

3.2 전산해석 기법

본 연구에서는 범용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분 방정식의 해를 구하였다. FLUENT는 현재 전세계적으로 널리 사용되고 있는 범용 열유체 해석 프로그램중 하나로 기본 수치해법은 유한체적법을 사용하며, 속도와 같은 벡터량과 압력, 온도 등과 같은 스칼라량을 같은 위치에 저장하는 엇갈림 격자계를 사용한다. 대류항을 계산하기 위한 격자점 보간은 Power-law 법, 2차 고차 상류 차분법은 QUICK법을 선택하여 사용할 수 있다. 난류유동 해석에 있어서는 k-ε 모델을 기본적으로 사용하고, RSM (Reynolds stress model)과 RNG (Renormalization group) 모델을 선택적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 수평채널과 원자로용기 환형공간에 대해 각각 시간간격 0.01초로 5초까지 비정상 상태 해석을 수행하였으며, 난류모델은 k-ε 모델, 격자보간법은 power-law법 그리고 수치해법은 SIMPLE알고리즘을 사용하였다. 수렴판정은 압력, 속도(U, V) 난류에너지 그리고 소산율(Dissipation)의 Normalized residual이 동시에 10^{-5} 이하로 떨어질 때 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

4 해석결과 및 고찰

4.1 형상 및 경계조건 [그림 1, 2 참조]

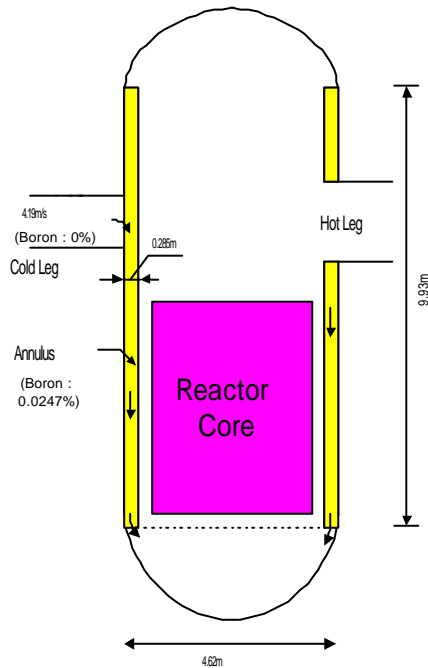


그림 1. 원자로용기 환형공간 개략도

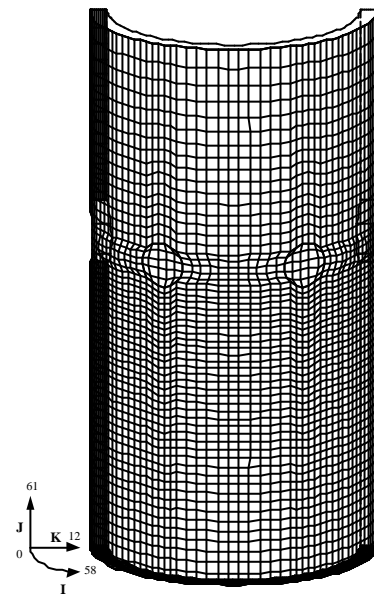


그림 2. 환형공간의 격자생성

환형공간은 원자로용기의 외벽과 내벽사이의 공간으로 형상은 높이 9.93m, 외벽의 직경은 4.62m이며, 폭이 30cm인 길고 폭이 좁은 형상이다. 또한 원자로용기는 2개의 고온관 주입노즐과 4개의 저온관 주입노즐이 용기 벽에 대칭적 (Symmetric)으로 배치되어있어 전체 360° 원통형 환형공간을 1/2 환형공간에 대해서만 해석을 수행하는 것이 가능하다. 붕산수가 주입되는 저온관 주입노즐은 높이 5.5m 지점에 위치하며, 환형공간 높이에 따른 해석결과와 분석을 위해 환형공간의 아래 부분에서부터 높이 0.8m (J=5), 2.4m (J=15), 4.3m (J=30) 및 7m (J=50)인 위치에 대해 각각 해석 결과를 취득하였다.

해석에 사용된 격자수는 최초 24440개에서부터 시작하여 63648개까지 격자수를 변화 시켜가면서

해석을 수행한 결과 정확한 유체유동 예측과 최적의 계산 시간을 얻을수 있는 42456개 (I×J×K : 58×61×12)로 정하고 해석을 수행하였다.

물질전달 해석에서는 환형공간 내부 유체의 물리적 변수들 (확산계수, 밀도, 점도, Schmidt수, 압력 등)을 온도 313K 일 때의 값을 사용하였으며, 환형공간내 봉산의 초기 농도는 전체 유체에 대해 0.0247% (2470ppm) 존재하는 것으로 가정하였다. 입구로부터 유입되는 유체는 298K의 순수 봉산 농도는 0%이며, 환형 공간으로 유입되어 봉산 희석현상을 초래하게되며, 이때 각 시간대별로 봉산 농도 분포를 해석하였다.

열전달 해석에서는 물질전달과 동일한 온도에서의 경계조건을 사용하여 해석을 수행하였다. 즉 봉산농도가 높은 환형공간 내부 유체를 고온의 유체로 (313K) 가정하고 봉산농도가 낮은 (농도 = 0) 주입 유체를 저온의 유체로 (298K) 가정하여 시간이 경과함에 따라 환형공간 내부 유체의 온도가 낮아지는 현상을 해석하였다.

4.2 유동, 온도, 봉산농도 분포

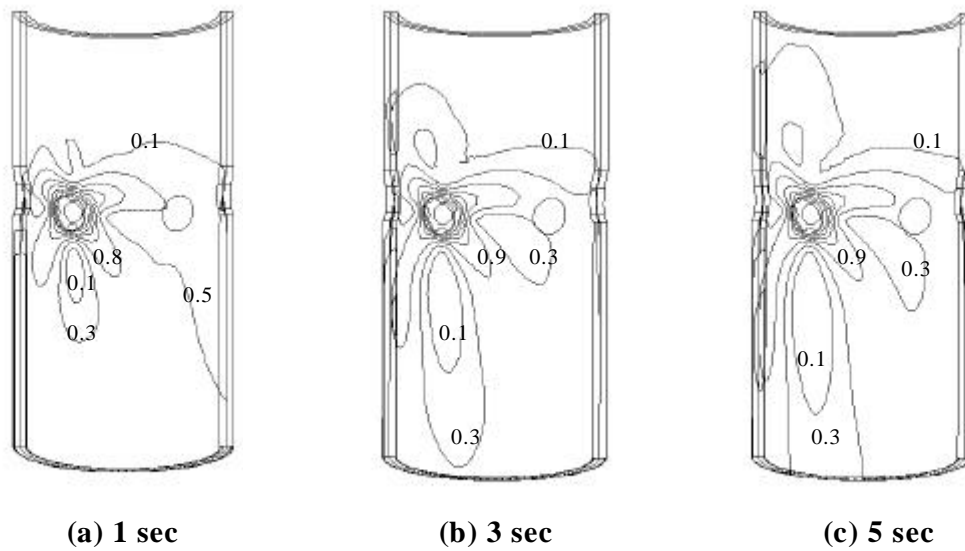


그림 3. 환형공간에서의 시간대별 유체유동 분포(m/s)

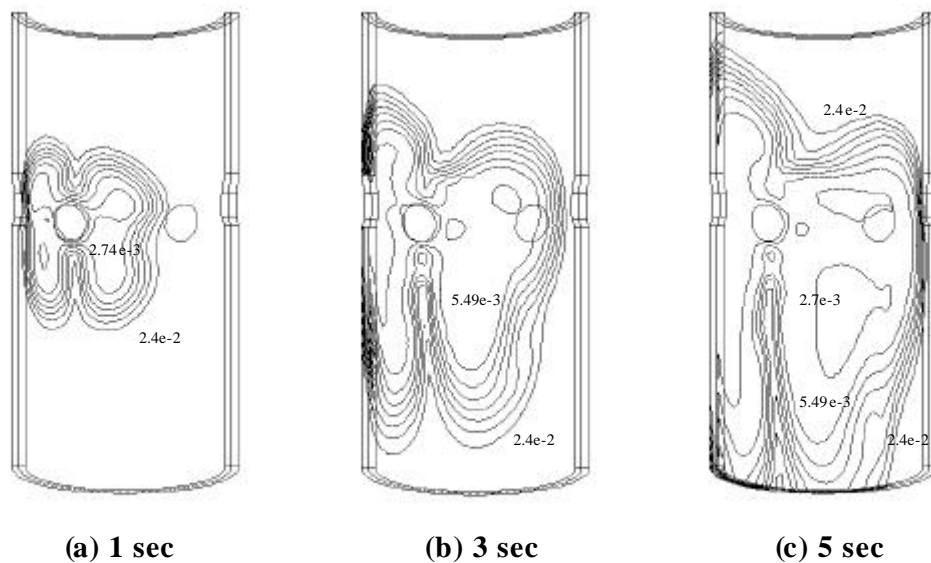


그림 4. 환형공간에서의 시간대별 봉산농도 분포(%)

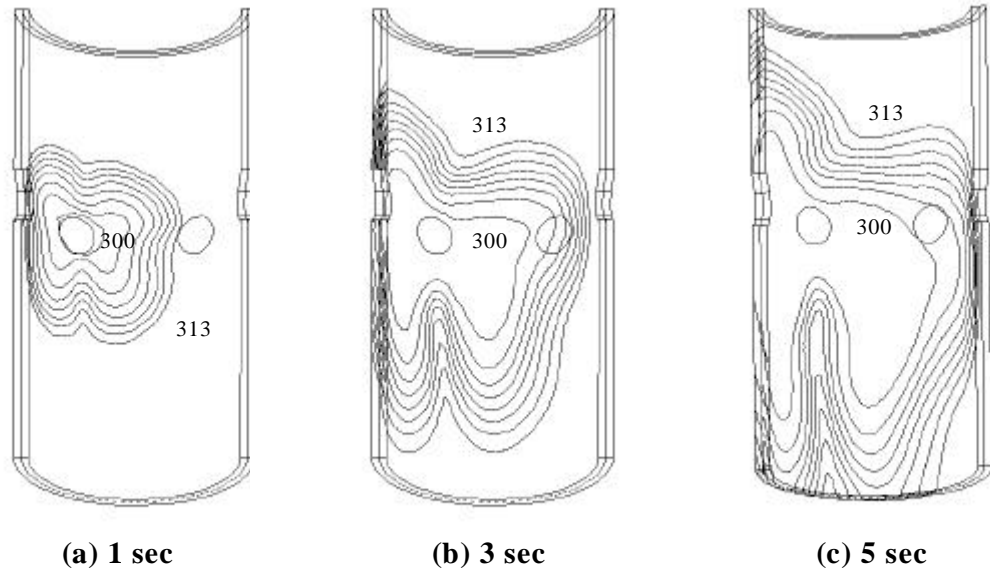


그림 5. 환형공간에서의 시간대별 온도 분포(K)

환형공간에서의 유체 유동은 좁고 긴 환형공간 형상의 특성과 고속으로 주입되는 유체의 속도에 의해 비교적 복잡한 유동 형상을 보여 주고 있다. 빠른 속도로 주입된 비봉산수는 환형공간 안쪽 벽에 부딪치면서 넓게 퍼져 나가고 이때 주입구를 중심으로 주변에 와류가 발생되며, 와류의 영향으로 비봉산수는 환형공간 내부의 봉산수와 잘 혼합되어 환형공간 출구측 빠져나간다. 유동은 출구측으로 갈수록 와류의 영향이 작아지고 하향 직선유류가 발달된 비교적 단순 유동으로 형성됨을 알 수 있다.

그림 3.에서는 각 시간대별 (1초, 3초, 5초) 환형공간내에서의 유체 유동을 보여주고 있다. 주입된 유체는 안쪽 벽면에 부딪친 후 속도가 급격히 감소하며, 넓게 사방으로 퍼져나가는 것이 관찰되었다. 특히 주입구 아랫부분과 상부는 와류에 의한 저 유속지역이 형성되며, 시간이 경과함에 따라 저 유속 와류지역이 확대됨을 알 수 있었다. 주입구에서 멀어질수록 유동 형태는 출구로 향하는 하향유류가 지배적이며, 단순한 유동을 보여주고 있다.

그림 4.는 각 시간대별 봉산농도 분포를 나타내고 있는데 시간이 경과할수록 환형공간내 봉산수 농도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 주입구 아래는 저 유속지역으로 유체 유동에 의한 영향보다는 확산계수에 의한 영향이 상대적으로 큰 지역으로 확산 상태에 따른 조밀한 농도 등고선을 보여주고 있다. 그림 5.는 온도분포의 변화를 나타내고 있다. 그 경향은 앞에서 설명한 봉산농도 분포 현상과 유사하나, 봉산농도 분포보다는 넓은 분포 상황을 보여주고 있다.

환형공간의 유동형태는 비교적 복잡하며, 와류 발생이 많으나 전반적으로 봉산농도 분포와 온도 분포는 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 다만 지역에 따라 유체의 속도가 낮은 지역에서는 유동에 의한 지배보다 확산에 의한 지배가 상대적으로 크게 나타나므로 속도가 낮은 지역에서는 물질확산 계수보다 확산계수가 큰 열확산계수의 영향으로 온도분포가 더욱 넓게 확산되어지는 것을 알 수 있다. 이것은 열전달 모델의 열확산 계수 ($\alpha = 1.5e-07$)가 물질전달 모델의 물질확산 계수 ($D_{AB} = 2.243e-09$)보다 큰 값을 가지기 때문인 것으로 판단된다. 즉 열확산계수 (α)값이 물질확산계수 (D_{AB})값보다 크므로 열은 더욱 빨리 물질속으로 확산되어 보다 넓은 분포를 보여주고 있다. 이러한 현상은 유체 유동의 영향이 적은 저 유속지역에서 잘 나타나고 있다.

4.3 국소 온도 및 봉산농도 무차원값 비교

그림 6.은 3초 경과시 환형공간 출구 부분에서의 경향을 나타낸 것으로 출구에서 유동현상은 와류의 영향이 거의 없고 대부분의 지역에서 하향 일직선 유로가 지배적인 단순 유동지역으로 두 무차원값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 7.은 시간 3초 경과시 주입구 주변의 온도 및 붕산농도 분포를 비교한 것으로 유사한 경향을 보이고 있으나 지역에 따라 무차원값의 차이가 발생하는 곳이 보여진다. 특히 저 유속지역인 주입구 아랫부분에서 두 무차원값의 차이가 나타나고 있는데 이것은 저 유속지역에서의 두 확산계수값 (열 확산계수, 물질확산계수)의 차이에 의한 것으로 판단된다. 그림 8.은 5초 경과시의 환형공간 출구 부분에서의 경향을 나타낸 것으로 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 9.는 5초 경과시 주입구 주변에서의 두 무차원값을 비교한 것으로 경향은 비슷하나 저 유속 지역에서 약간의 차이가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결론

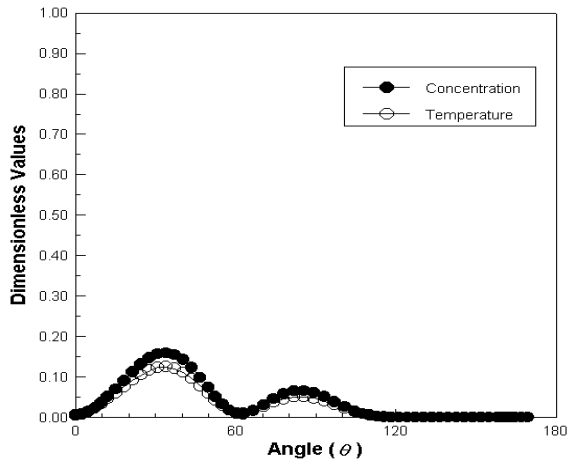
3차원 원자로용기 환형공간 해석결과 와류의 영향이 적은 대부분의 유동지역에서 온도 및 붕산농도 무차원값이 일치하는 것으로 나타났으며, 그 결과로 열전달과 물질전달 모델의 유사성을 확인할 수 있었다. 이것으로 온도 및 붕산농도 분포가 유체 유동상태에 의해 가장 많은 영향을 받으며, 유동이 복잡하지 않은 지역에서는 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 또한 와류가 발생하는 환형공간 주입구 주변의 복잡 유동지역에서는 온도 및 붕산농도 무차원값이 단순유동 지역에 비해 잘 일치하지 않음을 알 수 있는데, 이것은 와류발생에 의한 저 유속지역에서 열 및 물질 확산계수값의 차이에 의한 것으로 판단된다.

본 연구 모델의 경우 대부분의 유동지역에서 온도 및 붕산농도 분포가 유체유동에 의해 지배되고 확산계수값의 차이는 무시되나, 와류발생에 의한 저 유속 지역에서는 유체유동 보다 확산계수의 영향이 커지게 되어 열전달이 물질전달보다 활발하게 일어나 온도분포가 농도분포보다 넓게 확산되는 것을 알 수 있다.

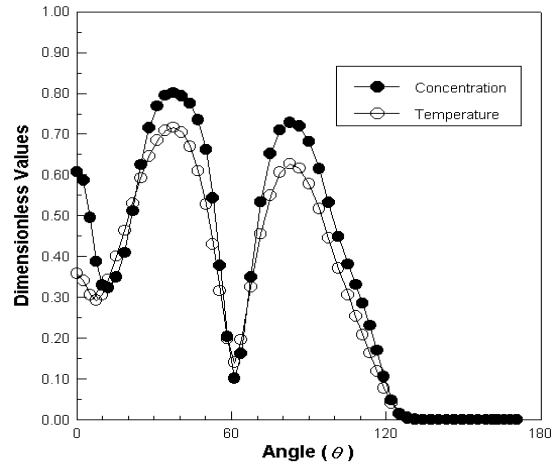
위의 해석에서 확인된 붕산희석 모델에서의 열전달 및 물질전달의 유사성은 추후 실험을 통하여 재검증할 필요가 있으며 그 결과를 통하여 붕산희석 해석의 실험적 방안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 유성연, "나프탈렌승화법을 이용한 사각봉과 직교기판에서의 물질전달에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989
2. R.J.Goldstein, J.Karni, & Y.Zhu, "Effect of boundary layer conditions on mass transfer near the base of cylinder in cross flow", J. of Heat transfer, Vol. 102, pp. 44-49, 1990
3. F.Alavyoon, B.Hemstrom, N.G. Andersson & R.I.Karlsson, "Experimental and computational approach to investigate -ting rapid boron dilution trasients in PWRs", CSNI specialist meeting on BDRT, 1995
4. H.P.Nourbakhsh & Z.Cheng, "Poten -tial for boron dilution during small break LOCA's in PWRs", CSNI specialist meeting on BDRT, 1995
5. Peter Gango, "Application of numeri -cal modelling for studying boron mixing in Loviisa NPP", CSNI specialist meeting on BDRT, 1995

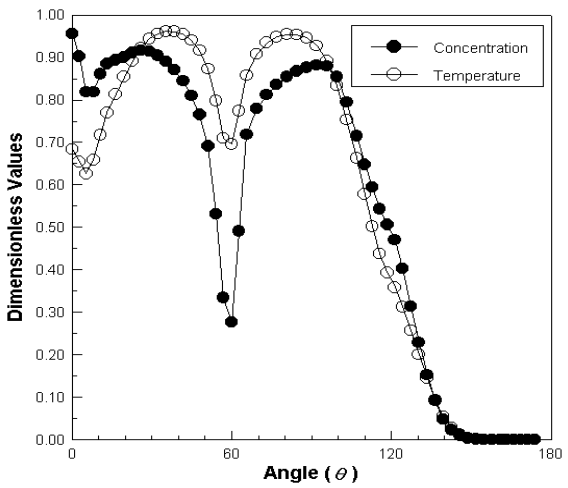


(a) J=5

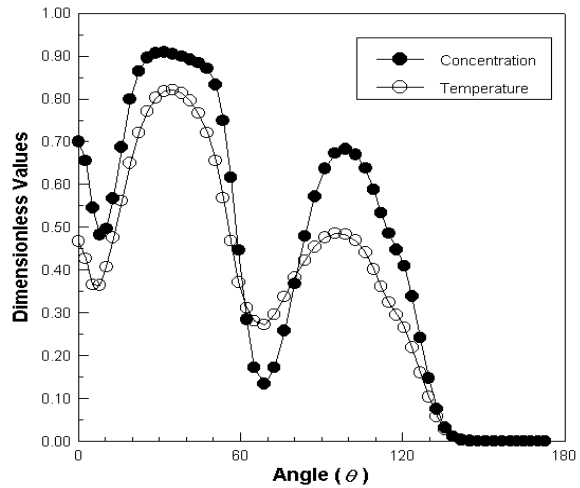


(b) J=15

그림 6. 3초 경과후 환형공간 출구 근처에서의 무차원 온도/불산농도 분포 비교

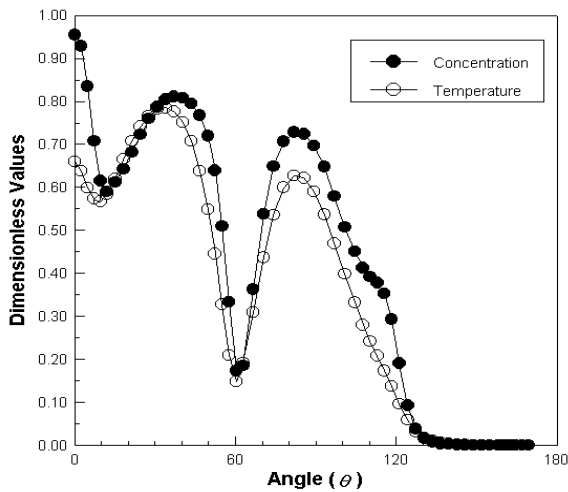


(a) J=30

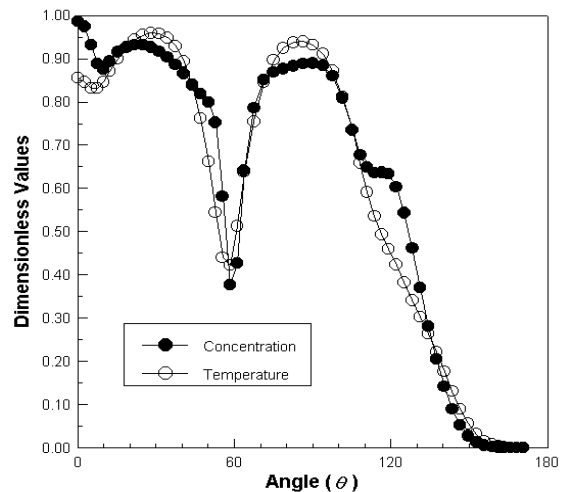


(b) J=50

그림 7. 3초 경과후 유입 노즐 근처에서의 무차원 온도/불산농도 분포 비교

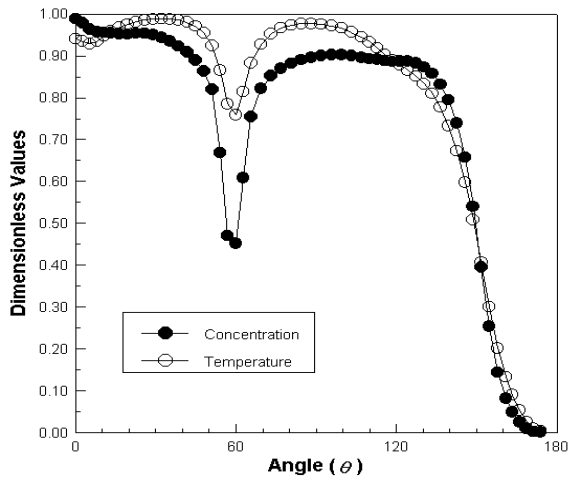


(a) J=5

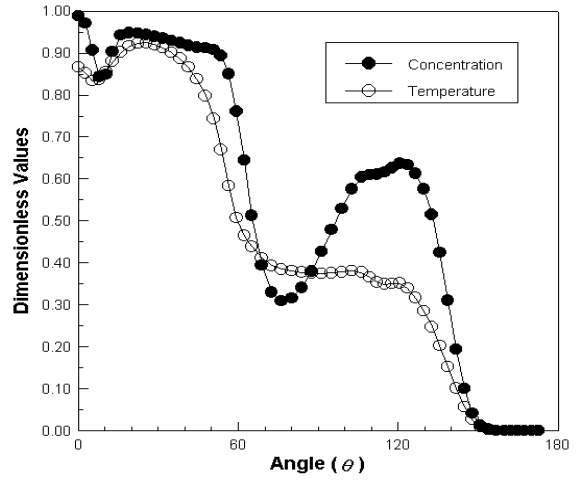


(b) J=15

그림 8. 5초 경과후 환형공간 출구 근처에서의 무차원 온도/불산농도 분포 비교



(a) $J=30$



(b) $J=50$

그림 9. 5초 경과후 유입 노즐 근처에서의 무차원 온도/농도 분포 비교