2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SPEL 감속재 건전성 실모형 평가 및 열수력인자에 대한 민감도분석

Assessment of Moderator Integrity Using Realistic Model and Parametric Studies on Thermal-Hydraulic Characteristics in SPEL

유선오, 김만웅, 강석철, 김효정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

민병주, 윤 철

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

중수로 감속재 계통을 모사한 SPEL 실험에 대한 열수력적 특성을 고찰하기 위하여 3차원 유동과 온도분포를 실규모 모델로 해석하였다. 또한 주요 열수력학적 변수들(감속재 주입유량, 주입온도, 열 발생량)이 감속재의 온도 및 유동분포에 미치는 영향을 파악하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 SPEL 감속재실험의 주입유량과 열 발생량에 따라 계통 내에서 형성되는 3가지 유동 천이특성을 확인하였고, 천이시 유동형태의 변화에 대한 특성선도를 제시하였다. 또한 감속재 유량이 시간에 따라 변하는 경우 감속재 내 시간에 따른 유동 및 온도분포의 거동을 살펴보았다.

ABSTRACT

Three-dimensional analyses of fluid flow and heat transfer have been performed to assess thermal-hydraulic characteristics for moderator simulation conducted by SPEL(Sheridan Park Experimental Laboratory) experimental facility. The parametric study has also carried out to investigate the effect of major parameters such as flowrate, temperature, and heat load generated from the heaters on the temperature and flow distribution inside the moderator. In this study, three flow patterns have been identified in the moderator with flowrate, heat generation, or both. As the transition of fluid flow is progressed, it is found that the dimensionless numbers (Ar) and the ratio of buoyancy to inertia forces are constant. Moreover, the behavior of temperature distribution inside calandria has also been investigated, when the flowrate of moderator is changed with time.

1. 서 론

중수로 원자력발전소에서 냉각재상실사고로 인한 칼란드리아관과 압력관의 접촉으로 관 표면에서 dry-out이 발생할 경우 핵연료 채널이 파손될 수 있기 때문에, 감속재는 충분한 과냉각도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 압력관의 건전성에 관한 해석은 몇몇 전산코드에 의해 수행되었으며, 캐나다원자력안전위원회(CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission)는 현재의 안전여유도가 매우 빈약한 상황을 고려할 때 감속재 온도 해석은 적절한 검증을 거치지 않고 있다는 입장을 가지고 있어, 감속재 온도 해석에 대하여 많은 관심을 보이고 있다.

냉각재 상실사고 안전해석에서는 감속재의 과냉각도를 평가하기 위해 칼란드리아 내의 감속재 온도에 대한 정보가 필요하지만, 실제 원전에서는 감속재의 칼란드리아 입, 출구 온도만을 측정할 수 있기 때문에, 일반적으로 전산코드를 사용하여 감속재의 유동패턴과 온도를 계산한다. 그 중 MODTURC_CLAS코드 검증에서는 2차원 실험데이터가 사용되었는데, 1995년에 CNSC는 감속재 온도 해석결과의 불확실도가 너무 크다고 판단하여 CANDU 피인허가자에게 3차원 실험을 수행하도록 요청하였고, 또한 캐나다원자력공사(AECL: Atomic Energy of Canadian Limit)에게 CANDU-9의 인허가 전제조건으로 3차원 실험의 필요성을 제시하였다.

이를 위해 CRL(Chalk River Laboratory)에 1/4-scale 3차원 실험설비가 제작되어 CANDU-9에 대한 많은 실험이 수행되었다. 그리고 캐나다 내의 CANDU에 대하여 CNSC가 각 발전소의 개별조건에 대해 각각 실험을 수행하도록 하고 있다. MODTURC_CLAS 코드는 이러한 3차원 실험데이터로 검증을 다시 수행하였고, 그 결과 이 코드는 CANDU-9에 대한 실험데이터를 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

현재 우리나라에서도 칼란드리아 내 감속재의 유동패턴과 온도분포에 관하여 상용 열유체해석코드인 FLUENT, CFX 등을 이용한 전산해석연구가 수행[1, 2]되었고, 그 결과 SPEL의 실험결과와 비교적 잘 예측하고 있음을 보였다. 본 연구는 지난 연구[1]의 연장으로써, FLUENT코드를 이용하여 SPEL의 실험장치를 모사하고 주요 입력변수들이 칼란드리아 내 감속재의 온도분포에 미치는 영향을 파악하기 위한 입력변수들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이 때 주요 입력변수로써는 감속재 주입유량과 주입온도, 그리고 히터에서의 열 발생량이다. 또한 이 주요 입력변수들이 시간에 따라 변하는 경우 칼란드리아 내 감속재 온도분포의 시간에 따른 거동을 살펴보았다.

2. SPEL 실험의 전산해석결과

2.1 SPEL 실험장치의 모사

SPEL 실험은 CANDU 원자로에서 칼란드리아 내의 감속재 순환유동의 이해를 위한 것으로서, 실제 CANDU 원자로의 축소 모형은 아니지만, CANDU 원자로의 전형적인 특성들을 가지고 있다. 그 특성들은 원통형 통 즉, 칼란드리아 내에서 형성된 재순환 유동, 칼란드리아 내에서 체적당 열 생성에 의한 비등이 없는 유체의 가열, 그리고 칼란드리아 축에 평행하게 나열된 수평관들의 2차 배열 등이다. 그림 1-a는 SPEL 실험의 모형 칼란드리아 개략

도를 보여주고 있고, 표 1은 SPEL 실험 장비에 대한 사양을 정리한 것이다. 본 해석에서는 감속재 강제순환과 내부 발열에 의한 자연대류가 공존하는 경우이므로 부력을 모사하기 위해 Boussinesq 가정을 적용하여 감속재 밀도의 변화가 온도에 선형적으로 비례하도록 하였다. 그리고 난류모델로는 표준 k-ε 모델을 벽함수와 함께 사용하였고, 내부영역은 일정한 사각 피치로 배열되어 있는 52개의 수평관들을 열 발생원으로 모사하였다.

전산해석을 위한 SPEL 실험장치의 격자구조는 그림 1-b와 같이 칼란드리아 외부영역에 대해서는 정형격자로, 열 발생원인 수평관이 설치된 내부영역은 비정형격자로 구성하였다. 입구 와 출구의 실제형상을 단순화하여 입구는 칼란드리아 측면 내부에 2개의 별도 체적을 설정하여 내부에서 감속재가 유입되도록 하였고, 출구는 아래쪽 경계면의 일부로 설정하였다.

2.2 SPEL 실험결과와의 비교

감속재 유량이 0.5kg/s이고 열 발생량이 10kW인 경우, SPEL 실험결과와 마찬가지로 본 전산해석결과에서도 부력이 주도적인 유동(buoyancy dominated flow)이 관찰되었고, 그림 2은 칼란드리아 내에서 감속재 온도의 수직분포를 보여주고 있다.

중앙에서 온도의 수직분포(그림 2-a, b)는 본 해석결과와 PHOENICS코드의 계산결과는 SPEL 실험데이터와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있고, 온도는 윗부분으로부터 단순감소하는 경향을 보이고 있다. 2DMOTH코드 결과는 칼란드리아의 밑부분으로 갈수록 SPEL 실험데이터보다 낮게 예측하였다. 그러나 감속재 입구쪽에서 가까운 곳(그림 2-c, d)에서 온도의 수직분포를 살펴보면, 주입되는 감속재의 운동량으로 인해 찬 감속재가 지나는 경로에 위치한 곳에서는 온도가 급격히 감소한 후, 칼란드리아 내의 열생성에 의해 온도는 증가하다가 밑부분에서는 다시 완만히 감소하는 경향을 보이고 있다. SPEL 실험과 해석결과 모두 같은 경향을 보이고 있으나, 측정온도와 계산온도의 차이는 최대 약 2.5℃이었다.

2.3 칼란드리아 내 감속재의 유동양식

SPEL 실험결과와 마찬가지로, 해석결과에서도 칼란드리아 내의 감속재 유동은 감속재의 주입유량, 열 발생량에 따라 크게 3가지 유동양식(momentum dominated flow, mixed type flow, buoyancy dominated flow)으로 변한다는 것을 알 수 있었고, 그림 3은 각각의 전형적인 유동양식을 보여준다. 열 발생량이 적고 감속재의 주입유량이 많으면, 열 발생으로 인한 부력보다 감속재의 운동량이 칼란드리아 내의 온도분포에 더 큰 영향을 주기 때문에, 감속재 최고온도는 칼란드리아 밑부분에 위치하게 되고(momentum dominated flow, 그림 3-a), 비교적 빠른 유속으로 인하여 감속재로의 열전달은 상대적으로 작게 된다. 그리고 유동경로를 살펴보면, 주입되는 감속재는 중앙으로 집중한 후 출구쪽으로 배출되는 유동을 형성한다. 반면에 열 발생량이 크고 감속재의 주입유량이 작으면, 주입되는 감속재의 운동량보다 열 발생으로 인한 감속재의 부력이 더 큰 영향을 갖기 때문에 최고온도는 칼란드리아 윗부분에 위치하고(buoyancy dominated flow, 그림 3-b), 비교적 느린 유속으로 인하여 감속재로 더 많은 열이 전달된다. 유동경로를 보면, 감속재의 부력으로 중앙부근에서는 윗쪽으로 흐르고, 주입되는 감속재는 측면에서 이차유동을 형성하며 흐르게 된다. 어느 열 발생량과 유량범위에서는 감속재의 운동량과 부력의 조합된 영향 때문에 최고온도는 칼란드리아 중간에 위치하게 된다(mixed type flow, 그림 3-c).

2.4 주요 입력변수들에 대한 민감도 분석

그림 4, 5, 6은 각각 정상상태인 경우, SPEL 실험장치에서 주입되는 감속재의 주입속도(또는 주입유량), 주입온도, 열 발생량이 칼란드리아 내 감속재 온도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 먼저 감속재 주입속도의 영향(그림 4)을 살펴보면, 주어진 열 발생량에 대하여 주입속도가 증가할수록 칼란드리아 내의 감속재 최고온도와 출구온도는 모두 감소하는 경향을 보이고 있고, 칼란드리아 내 다른 열발생 조건(5, 10, 20kW)에서도 같은 결과를 얻었다. 또한 열 발생량의 증가에 따라 mixed type flow가 형성되는 주입속도의 범위가 넓어지는 경향을 보이고 있다. 출구온도의 변화는 감속재 주입속도에 따라 단순감소하는 반면, 칼란드리아 내의 최고온도 변화는 감속재의 유동양식에 따라 그 변화의 정도가 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 각 유동양식 내에서는 단순감소하는 경향이 각 유동양식의 천이영역에서는 감속재 주입속도의 증가에 따라 칼란드리아 내 감속재의 최고온도가 많이 감소하였다.

감속재 주입온도의 영향(그림 5)을 살펴보면, 칼란드리아 내에서의 최고온도와 출구온도는 감속재의 주입온도에 선형적으로 비례하였고, 이러한 경향은 칼란드리아 내 다른 열발생 조건(5, 10, 20kW)에서도 같은 경향을 보이고 있다. 즉 본 연구의 해석범위 내에 대하여 감속재의 주입온도는 칼란드리아 내 감속재의 유동양식에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

칼란드리아 내 감속재의 최고온도와 출구온도는 열 발생량이 증가할수록 칼란드리아 내 감속재의 유동양식에 관계없이 증가하는 경향(그림 6)을 보였다. 특히 감속재의 유량이 높은 상태(momentum dominated flow)에서는 열 발생량이 증가할수록 칼란드리아 내의 최고온도와 출구온도의 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

그림 7은 주어진 조건에서 칼란드리아 내에서 형성되는 감속재의 유동양식을 보여주고 있고, 이때, Ar는 부력과 관성력의 비로 정의되는 무차원 수이다. SPEL 실험장치에 대하여 Ar가 약 0.5일 경우, buoyancy dominated flow에서 mixed type flow로 유동천이가 발생하였고, Ar이 약 0.08일 때, mixed type flow에서 momentum dominated flow로 유동이 천이하였다. 즉, 칼란드리아 내 감속재의 유동양식 천이는 Ar수가 어느 상수값을 가질 때 발생하였다. 앞으로 실제 중수로에 대하여서도 계산을 수행하여 위 사항을 확인하고, 감속재의 유동양식선도를 작성하여, 부력과 관성력이 공존하는 중수로에서 운전조건을 찾는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

그림 8은 표2와 같이 주요 입력변수가 시간에 따라 변할 때 칼란드리아 내에서의 최고온도와 출구온도의 변화를 보여준다. Case 1은 모든 주요 입력변수들(감속재 주입속도, 주입온도, 열 발생량)이 시간에 따라 일정한 조건일 경우이다. 칼란드리아 내의 감속재 최고온도 변화는, 그림 8-a와 같이 초기에 급격한 온도상승과 심한 온도변화를 겪은 후, 약 1,200초 이후에는 일정한 온도로 수렴하는 형태를 보이고 있고, 이는 위 조건을 정상상태로 계산하였을 경우의 온도와 같은 값을 보여주고 있다. Case 2는 감속재의 주입온도와 열 발생량은 일정한 상태이고, 주입유량이 시간에 따라 변할 때의 경우이다. 주어진 열 발생량에 대하여 칼란드리아 내에서 형성되는 3가지 감속재 유동양식을 모사할 수 있도록 감속재의 주입유량의 범위를 정하였다. 그림 8-b에서 보는 바와 같이, 감속재 주입유량이 증가하는 초기에는 따라 칼란드리아 내 감속재의 최고온도와 출구온도는 증가하다가, 주입유량이 일정하게 된 이후에는, 최고온도와 출구온도는 일정한 온도로 유지하는 것을 볼 수 있고, 이 온도는 같은 유량을 주입하였을 경우의 정상상태 결과와 같은 값이다.

3. 결 론

본 연구에서는 냉각재 상실사고가 발생하였을 때, 중수로 핵연료 채널의 건전성 확보를 확인하고 감속재의 열침원으로서의 성능을 확인하기 위하여, 칼란드리아 내부에서의 감속재의 3차원 유동과 온도분포 해석을 FLUENT코드를 사용하여 수행하였다. 해석모델의 검증을 위해 SPEL 실험을 모사하여 실험데이터와 비교하였고, 주요 입력변수들이 칼란드리아 내 감속재의 온도에 미치는 영향을 살펴보고, 칼란드리아 내 감속재의 유동양식선도를 작성하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 전산해석결과, 칼란드리아 내에서 관찰된 감속재의 유동양식은 감속재의 주입유량(또는 주입속도)과 열 발생량에 따라 크게 3가지로 구분할 수 있고, 이는 각각 momentum dominated flow, mixed type flow 그리고 buoyancy dominated flow이다.
2. 감속재의 주입유량(또는 주입속도)이 증가할수록, 칼란드리아 내의 감속재 최고온도와 출구온도는 감소하는 경향을 보였다. 특히 유동양식의 천이영역에서는 감속재 주입유량의 약간 증가에 따라 칼란드리아 내 감속재의 최고온도가 많이 감소하였다.
3. 감속재의 주입온도가 증가할수록, 칼란드리아 내의 감속재 최고온도와 출구온도는 거의 선형적으로 증가하였고, 다른 열 발생량 조건(5, 10, 20kW)에서도 같은 결과를 보여, 감속재의 주입온도는 칼란드리아 내 감속재의 유동양식에 영향이 없는 것으로 나타났다.
4. 칼란드리아 내에서 발생하는 열이 증가할수록 감속재의 최고온도와 출구온도는 증가하였으며, 감속재의 유량이 높은 상태에서는 열 발생량이 증가할수록 칼란드리아 내의 최고온도와 출구온도의 차이가 증가하는 경향을 보였다.
5. 주요 입력변수가 시간에 따라 변할 경우를 모사하여 칼란드리아 내 감속재 온도분포의 시간에 따른 거동을 살펴보았고, 시간이 충분히 흐른 후의 감속재 최고온도와 출구온도는 입력변수의 최종조건에 대한 정상상태의 결과와 같은 값을 보여주었다.

참고문헌

[1] K. H. Bang, J. Y. Lee, S. O. Yu, M. W. Kim, and H. J. Kim, “A Three-Dimensional Analyses of Fluid Flow and Heat Transfer for Moderator Integrity Assessment in PHWR,” Proceedings of the KNS Spring Meeting, May, Gwangju, 2002.

[2] C. Yoon, B. W. Rhee and B. J. Min, “Validation of a CFD Analysis Model for Predicting CANDU-6 Moderator Temperature Against SPEL Experiments,” Proceedings of ICONE10, April 14-18, Virginia, USA, 2002.

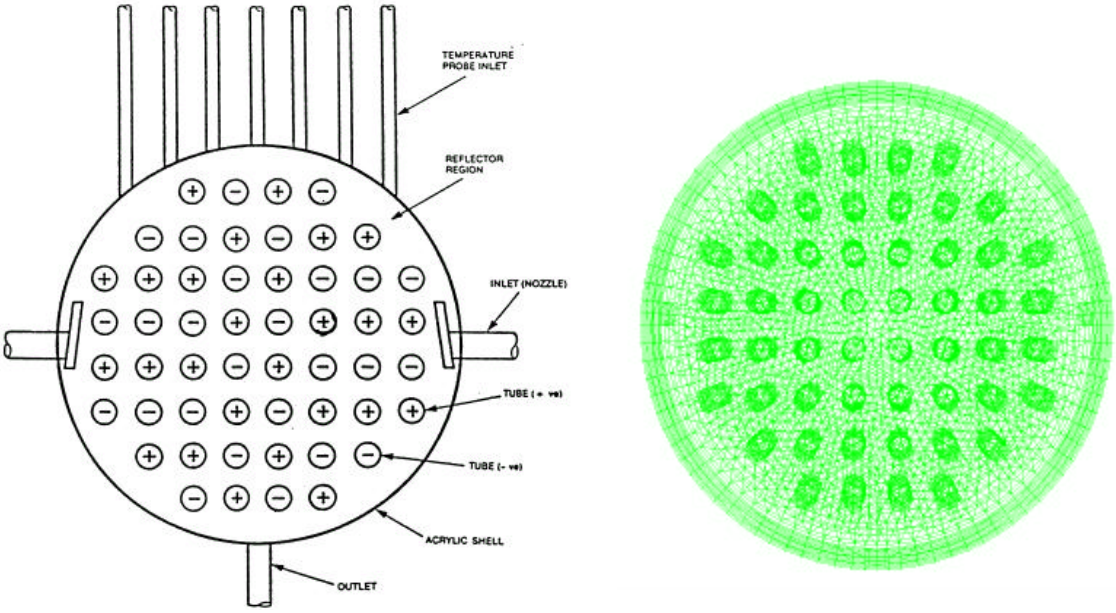
[3] D. Koroyannakis, R. D. Hepworth and G. Hendrie, “An Experimental Study of Combined Natural and Forced Convection Flow in a Cylindrical Tank,” TDVI-382, AECL, 1983.

표 1. SPEL 실험장치의 사양

	ID, [m]	OD, [m]	L, [m]	Number	Comment
Test Vessel	0.74	0.775	0.254	1	
Heater Tubes		0.038	0.254	52	0.075m square pitch

표 2. 입력변수의 시간에 대한 함수

Case	T_{in}, [℃]	V_{in}, [m/s]	Heat Load, [kW]	Time, [sec]
1	30	0.13	10	0~2,500
2	30	$-1.311\times10^{-5}t + 4.567\times10^{-3}t + 0.11$	10	0~3,000



(a) SPEL 실험장치의 개략도 (b) 전산해석을 위한 mesh

그림 1. SPEL 실험장치의 개략도와 전산해석을 위한 mesh.

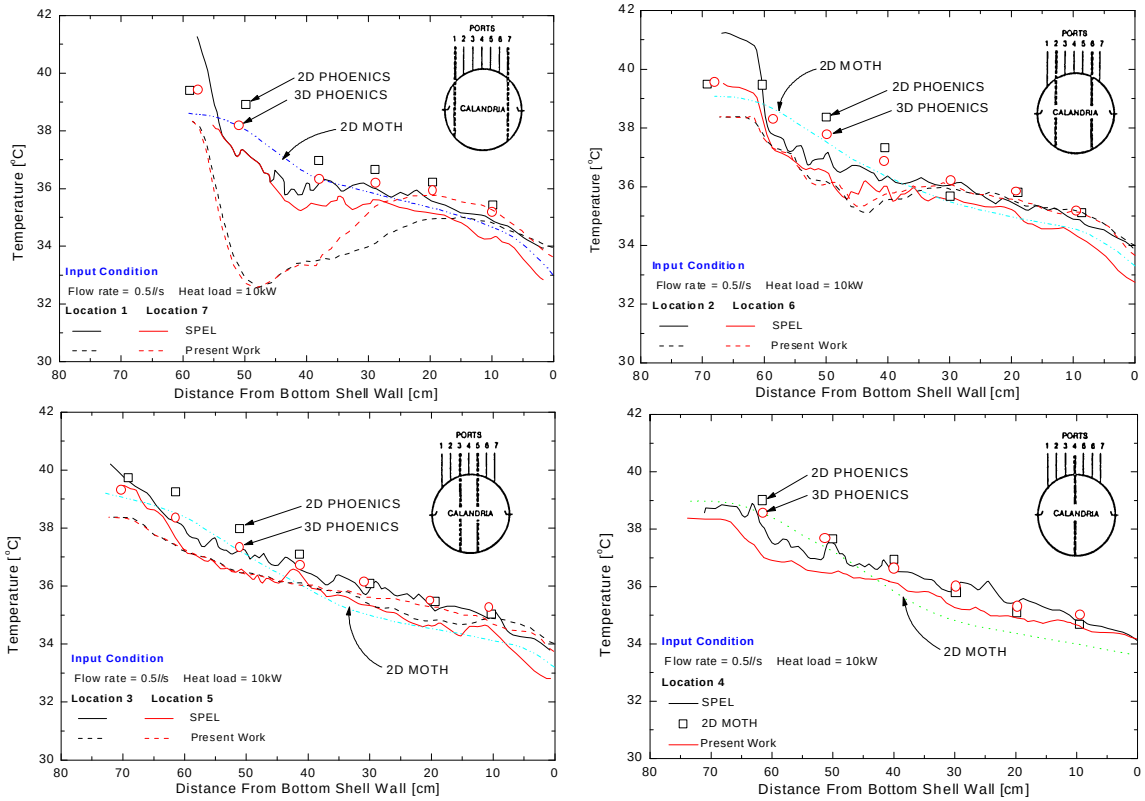
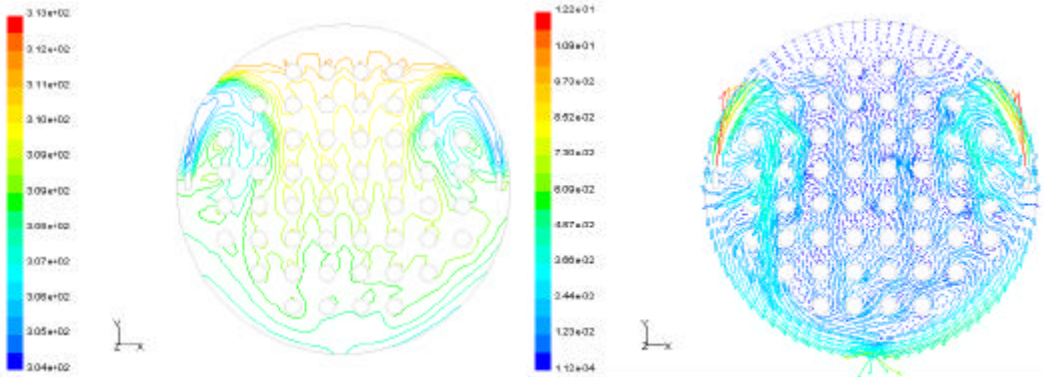
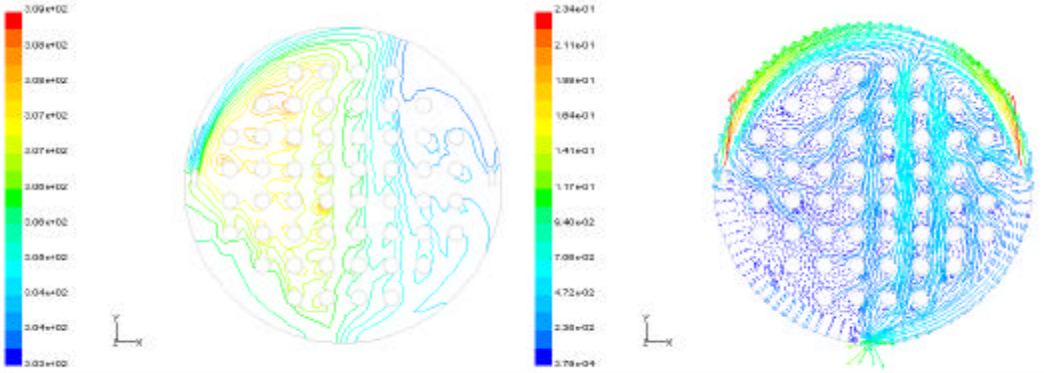


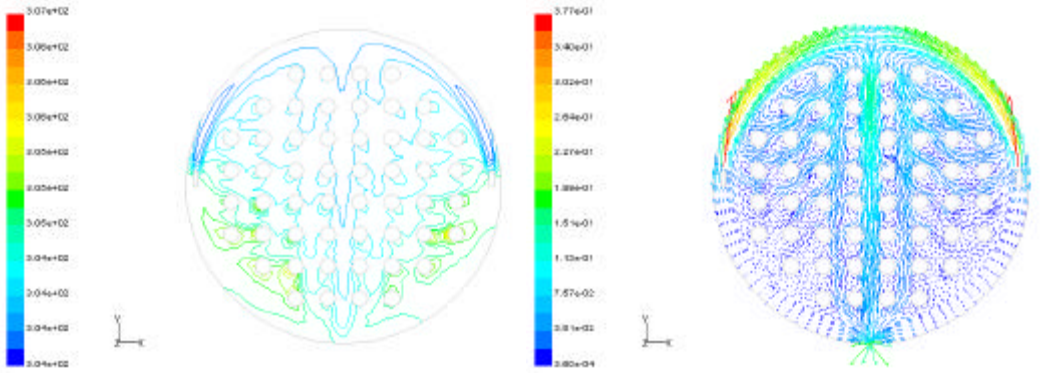
그림 2. SPEL 실험결과의 비교.



(a) buoyancy dominated flow (V_{in}=0.13m / s, T_{in}=30℃, Heat Load=10kW)



(b) mixed type flow (V_{in}=0.25m / s, T_{in}=30℃, Heat Load=10kW)



(c) momentum dominated flow (V_{in}=0.40m / s, T_{in}=30℃, Heat Load=10kW)

그림 3. 칼란드리아 내 감속재의 전형적인 유동양식.

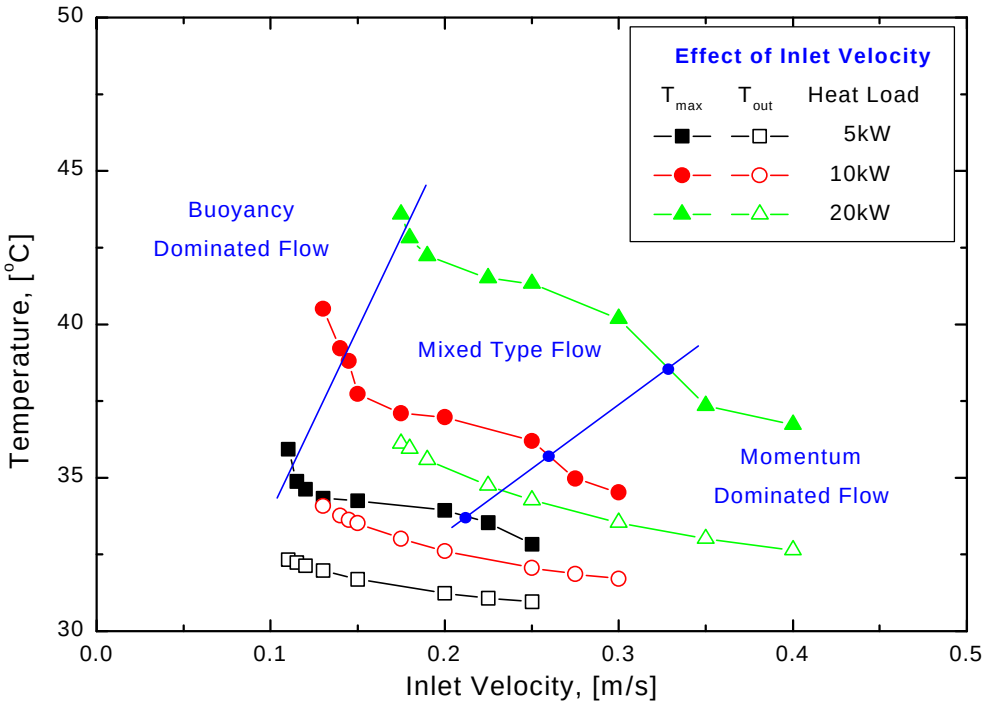


그림 4. 감속재 주입속도의 영향.

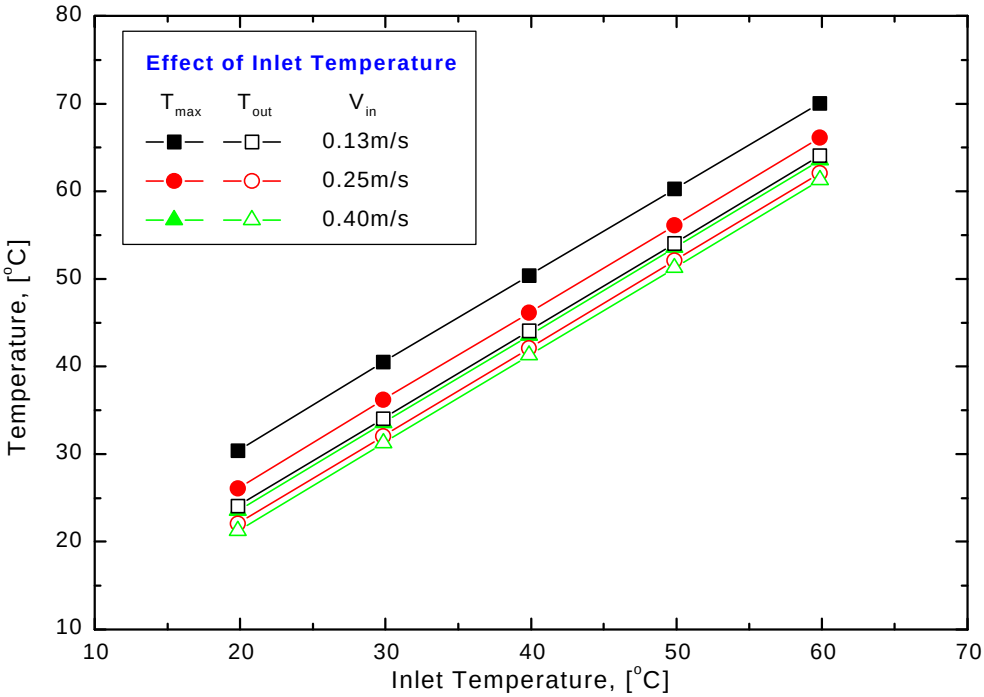


그림 5. 감속재 주입온도의 영향.

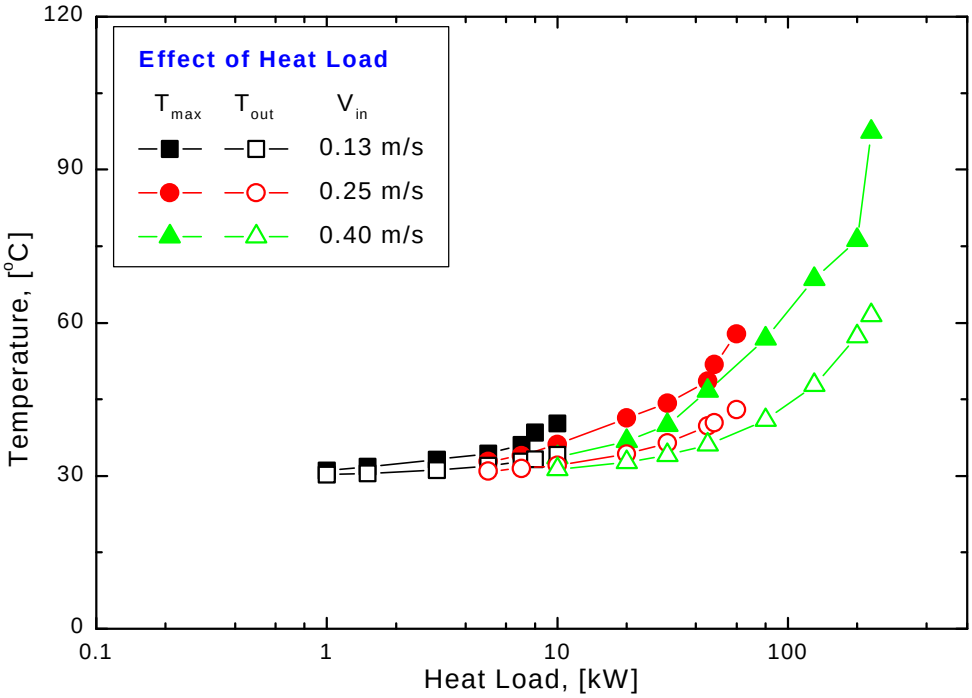


그림 6. 칼란드리아 내 열 발생량의 영향.

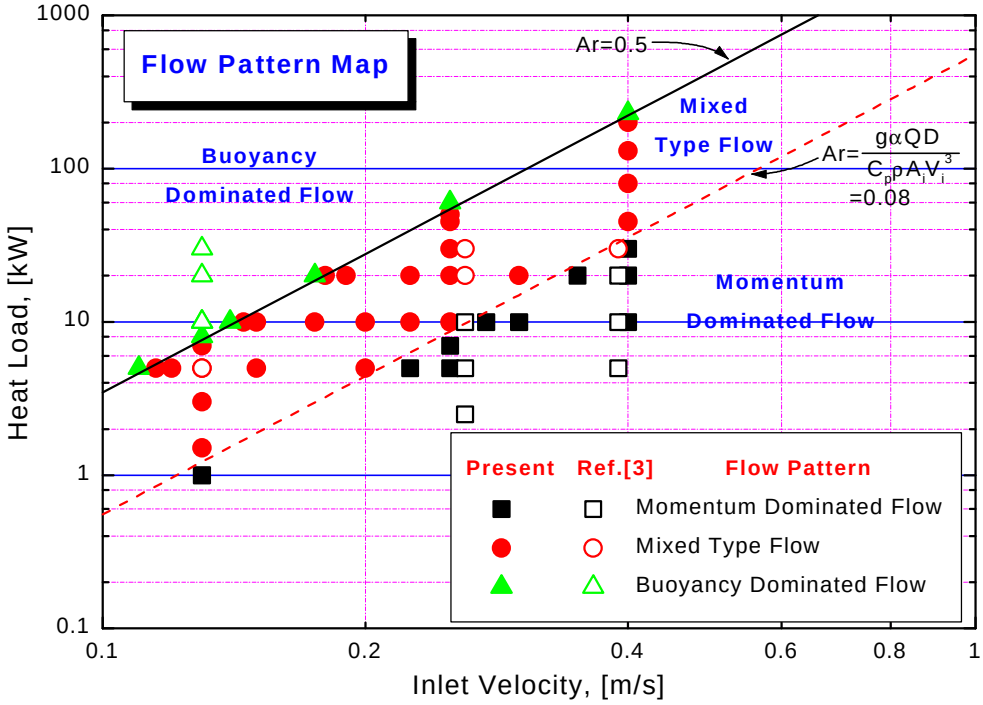
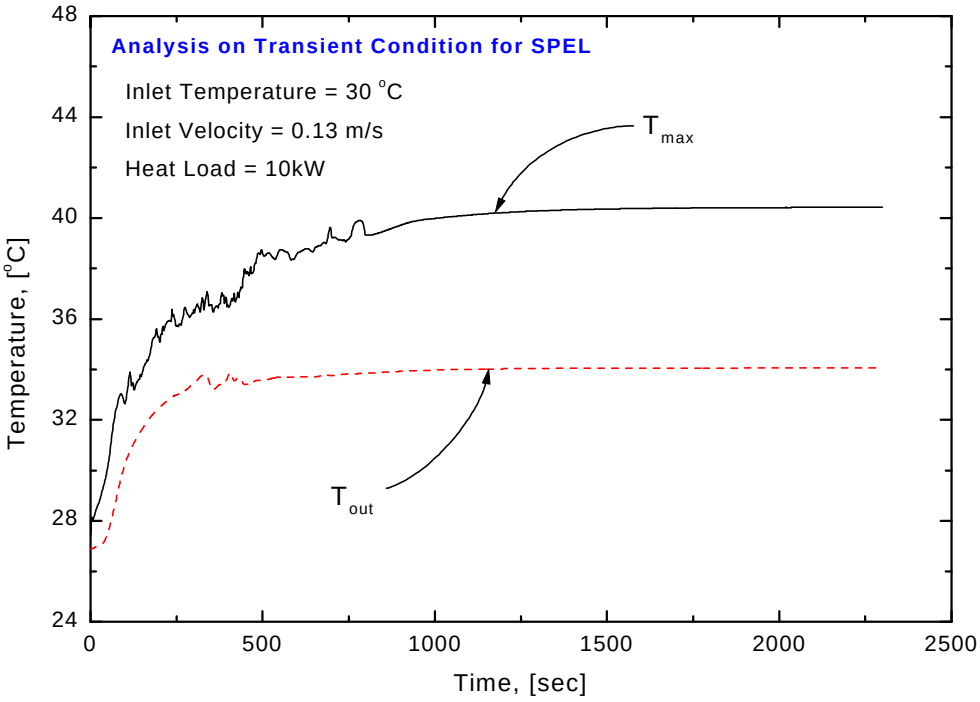
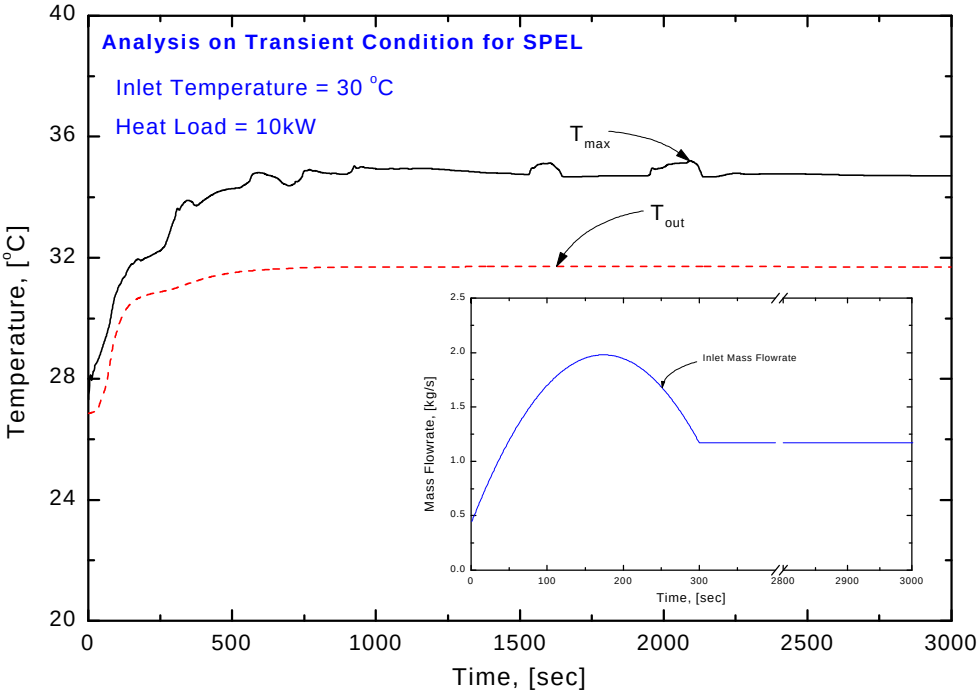


그림 7. 칼란드리아 내 감속재의 유동양식선도.



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 8. 시간에 따른 입력변수의 변화의 영향.