

## PSDRS의 잔열제거 특성 분석

심윤섭, 위명환, 김성오  
한국원자력연구소

### 요 약

국내의 첫 액금로가 될 KALIMER의 안전등급 잔열제거 계통인 PSDRS의 설계 및 설계/해석 방법론 설정을 위하여 기존의 PSDRS 해석 코드인 기존의 PARS를 개선시킨 PARS2-iB를 개발하고 이를 이용하여 PSDRS내부 전열모드의 정성적 및 정량적 특성, 그리고 PSDRS 설계에서의 우선 고려 대상 설계인자 및 PSDRS 설계 해석 방법론 설정을 위한 PSDRS 작동 mechanism의 열유체적 연결 특성을 파악하였다.

### 1. 서론

PSDRS(Passive Safety Decay heat Removal System)는, 국내 첫 액금로로서 그 개념설계의 개발이 진행중인 KALIMER의 안전등급 잔열제거 계통인데[1] 이 계통은 원자로 용기를 둘러싸고 있는 격납용기 외부를 공기의 자연순환에 의해 냉각하는 방식이다. 이때 공기 흐름 구동력은 격납용기 외벽에 의하여 가열된 공기와 주변 공기와의 밀도 차이에 의하여 피동적으로 형성된다. 이러한 개념은 완전한 피동개념의 잔열제거 방식으로서 높은 작동 신뢰성이 보장되며 발전소 사고 시에도 외부의 지원 없이 자체적인 자연현상에 의하여 잔열을 제거할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 개념의 작동은 원자로 pool의 소듐과 격납용기 밖의 공기가 열적으로 직접 연결되어 이루어짐으로 PSDRS의 작동 특성에 대한 이해 및 특성분석 방법론의 확보가 요구된다. 본 연구는 기 발표된 논문[2,3]에 대한 연속된 연구로서 PARS 코드의 개선 및 개선된 코드를 이용하여 공기 굴뚝의 영향 및 원자로 pool 인자와 원자로 밖의 열적 성능인자 간의 결합에 의한 PSDRS 작동 특성 및 계통의 과도기 특성을 분석하였다.

### 2. PARS2-iB의 개발

PARS2-i는 일차원 지배식에 의한 PSDRS 설계 해석 코드로서 그림1의 PSDRS 전 영역이 해석 대상이 되며 이는 이전 PARS의 해석대상 가능 영역을 원자로 pool 및 공기 굴뚝으로 확장한 것이다. 또한 이전의 PARS의 복사열전달 계산 routine의 수치적 불안정성을 개선하고 설계상의 다양한 종류의 경계 조건에 따라서 과도기 및 정상상태 특성을 해석할 수 있도록 개발되었다.

## 2.1 PSDRS 구조 및 열유로

PARS2-iB의 해석 대상인 PSDRS의 구조는 그림1과 같으며 노심의 붕괴열의 대부분은 노심 - 고온pool - 원자로 baffle과 원자로 용기간의 환형 공간의 유로 - 저온 pool - 노심으로 구성되는 폐회로의 소듐 유동에 의하여 노심에서 원자로 벽면으로 전달된다. 또한 일부 열은 원자로 baffle을 사이로 한 pool 소듐과 환형 공간의 소듐간의 직접적인 열전도에 의하여 원자로 용기로 전달되기도 한다. 원자로 용기로 전달된 열은 원자로 용기와 이웃하는 격납용기 사이의 복사열전달에 의해 격납용기로 전달되며 격납용기는 다시 공기 유로 분리기(air flow separator) 벽면과의 복사열 전달 및 공기와 대류 열전달에 의하여 공기 유로의 공기로 열을 전달시키며 가열된 공기는 굴뚝을 거쳐서 대기로 빠져나가면서 열을 계통에서 최종적으로 방출시키게 된다.

## 2.2 수학적 모형

원자로 내부의 소듐 유동 및 격납용기 밖 공기 유로의 공기 유동 및 열전달 현상을 아래 식 (1),(2)로 묘사한다.

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \sum_i \frac{\Delta S_i}{A_i} = \oint \rho g ds - \frac{\dot{m}^2}{2} \sum \frac{1}{\rho_i A_i^2} (K_i + f_i \frac{\Delta S_i}{di}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A_n \Delta x \rho C_P T)_i = \left( \frac{\dot{m} \bar{C}_P (T_{in} - T_{ex}) + (Q_{Baff} - Q_{RV}) + Q_{cond, st}}{\dot{m} (C_{Pin} T_{in} - C_{Pex} T_{ex}) + Q_{ce}} \right) \quad (2)$$

(2)식 우변의 첫째 줄은 소듐유동에 대하여, 그리고 두 번째 줄은 공기유동에 대한 것으로서  $Q_{baff}$ ,  $Q_{RV}$ ,  $Q_{cond, st}$ ,  $Q_{ce}$ 는 모두 다 제어체적 한 개에 대한 에너지 흐름을 종류별로 나타내는 것으로서 각각 순서대로 다음과 같은 의미를 지닌다. baffle을 통한 열전도량, 원자로 용기 벽으로의 전열량, 소듐 유선방향으로의 열전도량 및 격납용기벽로부터의 전열량.

격납용기 벽과 공기와의 열전달은 격납용기 벽면으로부터 공기로의 직접적인 열전달과 공기 유로 분리기 벽면으로의 복사열전달을 통한 우회적인 열전달 mode가 있으므로 이에 대한 전열량  $Q_{ce}$  다음과 같이 묘사한다.

$$Q_{ce} = hA_{ce}(T_{ce} - T_a) + \frac{\sigma A_{ce}(T_{ce}^4 - T_{sp}^4)}{1/\epsilon_{ce} + (A_{ce}/A_{sp})(1/\epsilon_{sp} - 1)} \quad (3)$$

지배식의 대수식으로의 체제전환은 온도 정의를 제어 체적의 경계면에서 수행하는 경계점 기법[4]을 사용한다. 경계점 기법은 기존의 제어체적 중앙에 온도를 정의하는 방법인 중앙점 기법에 비하여 대류항의 대수식화 과정에서 발생할수 있는 numerical diffusion의 전산해석상의 오차를 피할수 있으며 또한 중앙점의 수치적 안정성을 위하여 도입되는 상류치 기법(upwind scheme) 또는 이와 유사한 기법의 사용으로 인하여 온도점 정의가 모호해지는 단점이 없다.

이전의 PARS에 비하여 PARS2-iB에서 이루어진 해석 algorithm 개선 사항은 복사열전달식의 해법이다. PSDRS와 같은 원통형 구조물간의 복사열전달은 아래 식(4)로 표현될 수 있는 데

$$q''_{Rad12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + (A_1/A_2)(1/\epsilon_2 - 1)} \quad (4)$$

이 식의 형태를 보면 식이 미지수인 온도에 대한 4차식으로서 비선형성이 크며 이로 인하여 일반적으로 수치적 불안정성이 내재되어 있다. 실제적으로 연속반복법을 사용했던 이전 PARS에서는 수치적 불안정성으로 해석상의 어려움을 겪고는 하였었다. PSRS2-i에서는 이러한 어려움을 제거하기 위하여 복사식의 해를 수치적으로 구간양분법을 이용하여 구하는 방법을 사용한다. 구간 양분법은 조사 영역 내에 해가 포함되도록 조사영역이 설정되면 절대적인 수치적 안정성이 이루어지는 기법이다. 그러나 이 기법 사용의 성공성 여부는 해의 조사대상 구간 설정의 적절성 여부에 의해 좌우되는 데 PARS2-i에서는 이를 PSDRS 내 온도 값에 대한 요건으로부터((5)식) 설정한다.

$$T_a < T < T_N \quad (5)$$

이를 지배식과 연계하여 표현하면 조사대상 영역의 상한치 및 하한치는 식(6)으로 표현된다.

$$0 < Q_R < \text{최소} \left[ \frac{T_N - T_a}{R_{NRe}}, \frac{T_N^4 - T_a^4}{R_{ReCi}} \right] \quad (6)$$

여기서  $R_{NRe}$ 와  $R_{ReCi}$ 는 각각 원자로 내부의 환형공간내 소듐에서 원자로 용기 외벽까지의 열전달에 대한 전열 저항, 그리고 원자로 용기외벽과 격납용기내벽간의 복사열전달에 관한 저항에 관한 인자로서 구체적으로는 다음식 (7)과 같이 표현된다.

$$R_{NRe} = \frac{1}{(hA)_{Ri}} + \left( \frac{\Delta t}{kA} \right)_{RV}, R_{ReCi} = \frac{1/\epsilon_{Re} + \frac{A_{Re}}{A_{Ci}} \left( \frac{1}{\epsilon_{Ci}} - 1 \right)}{A_{Re}\sigma} \quad (7)$$

### 3. PSDRS 특성 해석

설정된 PSDRS 설계 및 작동 인자에 대한 기준 경우를 설정하고 이 경우의 조건을 중심으로 하여 개발된 PARS2-iB를 적용하여 얻은 분석 결과는 다음과 같다.

그림2는 PSDRS작동시의 계통 작동 특성 인자의 과도기 특성으로서 PSDRS의 전반적인 특성을 보이고 있다. 계산은 노심 정지후 100초부터 계산이 시작됐었으며 이 때의 조건은 노심출구온도=520C, 고온pool 출구온도=530C, 소듐유로 출구온도=450C, 노심입구온도=440C이었다. 초기에는 PSDRS제거량( $Q_{psdrs}$ ) 보다 붕괴열( $Q_{dec}$ ) 더 많아 pool 내부의 온도가 증가하는 데 시간이 지남에 따라  $Q_{dec}$ 는 감소하는 반면  $Q_{psdrs}$ 는 pool 온도의 증가로 역시 증가함으로 온도 상승률이 감소하다가 결국은  $Q_{dec}$ 와  $Q_{psdrs}$ 가 같아지는 시점에서 최대 온도가 이루어지며 이 이후는 온도가 감소하게 된다. 공기출구온도의 변화는 pool 소듐온도에 비하여 그 변화가 완만한데 이는 다음에 설명되는 열전달 저항 때문이다.

그림3과 4는  $Q_{dec}=2.5\text{MW}$ 의 정상상태(steady state)시의 전열특성으로서 역시 PSDRS의 기본적인 열전달 특성을 나타내고 있다. 그림3은 원자로내부 환형 공간의 소듐으로부터 공기까지의 온도분포를 그리고 그림 4는 PSDRS 각 구간별 전열모드의 전열저항( $R_i=Q_i/\Delta T_i$ )의 분포를 PSDRS 하부서부터 상부순으로 보이고 있다. 이로부터 가장 큰 전열저항은 격납용기외벽에서 공기로의 전열구간의 저항으로서 이 구간의 저항이 전체 전열저항의 약 반정도를 차지하며 그 다음은 원자로 용기(RV)와 격납용기(CV)간의 복사열전달( $R_{RV,복사}$ )이 됨을 알 수 있다. 공기 유로내 공기로의 전열은 앞의 수학적 모형항에서 설명하였듯이 격납용기 외벽에서 공기로의 직접적인 대류열전달과 공기유로 분리기로의 복사열전달을 통한 대류, 두 모드의 전열모드가 공존하는 데 복사열전달을

통한 간접대류의 기여도는 굉장히 커서 이 지역의 전열저항( $R_{Cv\text{공기}}$ )을 거의 1/2로 줄이고 있는 것으로 나타났으며 PSDRS 총열제거량에서는 이 복사모드를 고려할 경우와 하지 않을 경우의 차이가 28%로 비교됐다. 이는 PSDRS 전열 성능 중 가장 중요한 전열 모드가 복사열전달임을 의미한다. 또한 전열저항이 PSDRS 상부 쪽으로 갈수록 작아지고 있는 데 이러한 경향은 복사열전달이 높은 온도에서 더 효율적이며 또한 공기유로의 대류 전열저항 역시 상부로 갈수록 온도의 증가에 따른 공기의 물성치 변화에 따라 대류계수가 증가하기 때문이다.

그림5는 그림6,7과 함께 소든헤터의 온도를 고온은 535.83C, 저온은 491.54C로 고정하고서 정상상태 해를 구하여 설계인자와 PSDRS 열제거량( $Q_{psdrs}$ )의 상관성을 분석한 결과이다. 굴뚝이 높아짐에 따라 공기측 head 차이의 증가로 유량이 증가하고 이에 따라  $Q_{psdrs}$ 도 증가함을 보이는 데 공기유량의 현격한 증가에 비하여  $Q_{psdrs}$ 는 비교적 완만한 증가를 보이고 있다. 그 이유는, 정상적으로는 높이 10m와 50m 경우에 대하여 비교, 공기 유량의 증가로 인한 대류계수의 증가(40% 정도)가 이루어지지만 거의 변하지 않는 공기유로측의 복사열전달 모드로 인하여 공기유로의 전열저항은 이보다는 작은 값(27%정도)이 되며 이는 PSDRS내의 또 다른 큰 저항 요소인 RV와 CV간의 복사 열전달 저항으로 인하여 전체적으로 나타나는 전열량 증가 효과는 더욱 작은 값(20여%)이 되는 것이다. 이로부터 PSDRS의 설계 작업을 BOP에 해당되는 공기 굴뚝 높이나 배치 등의 영향은 일단은 이차적으로 취급하고 일차적으로는 NSSS 측의 설계인자에 초점을 맞추어서 수행할 수 있음을 알 수 있다.

그림6은 그림 3,4에서 PSDRS에서 가장 큰 전열저항 요소로 확인된 공기유로로의 전열저항을 줄여서 PSDRS의 전열능력을 향상시키기 위한 기본 여건 유무 여부를 평가하기 위한 작업의 결과이다. 공기유로의 전열능력을 증가시키기 위하여는 공기유로 형상의 변형 또는 별도의 구조물의 부착을 생각할 수 있는 데 이는 필연적으로 공기유로의 유동 저항을 증가시키게 되어 대류열전달 성능을 감소시키는 기본적인 면이 있다. 그러나 그림에 보인 바와 같이 공기 유로의 저항계수  $K$ 를 추가적으로 4만큼 증가시켰을 경우  $Q_{psdrs}$  감소량은 7%정도가 되어 상황은 비관적이지는 않은 것으로 나타났다.

또한 복사면의 복사계수(emissivity)의 변화 영향에 대한 조사에서는 복사계수변화에 대한  $Q_{psdrs}$ 에 대한 민감도(%/%)가 거의 1에 가까워 복사면의 표면 처리 및 관리가 중요함을 알 수 있었다.

그림7과 8은 pool 소듐온도의 변화에 대한 정상(steady)상태의 영향으로서 그림7은 RV 환형공간내의 소듐온도가 동일(uniform)한 경우이며 그림8은 소듐의 평균온도를 일정하게 유지하면서 고온과 저온간의 차이를 변경시킨 경우이다. 먼저 그림 8에서 보면 환형공간내의 소듐온도 분포가  $Q_{psdrs}$ 에 미치는 영향은 미미하며  $Q_{psdrs}$ 는 환형공간내의 평균온도에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 따라서 RV 후단의 PSDRS 설계 해석시 pool 온도분포는 무시한 채 평균온도에 대한 고려로 해석이 가능함을 알 수 있다. 다시 그림7로 가서 보면, 소듐온도의 증가에 따른  $Q_{psdrs}$ 의 변화가 현저하게(20%/50C) 이루어지며 온도의 증가에 따른 변화율이 고온에 가서 약간 급해지기는 하지만 거의 선형적으로 이루어짐을 알 수 있다.

그림 11에서 12은 원자로 측에 대한 분석으로서, 전열면적을 일정하게 유지시키는 가운데 원

자로의 직경(D)과 길이(L)가 변화될 경우의 영향인 그림 9과 10을 보면 원자로의 형상이 길쭉해질수록 공기유로의 대류 저항이 작아져서 PSDRS의 성능이 증가하지만 그 크기는 L/D의 50% 변화에 3%의 Qpsdrs의 변화로 PSDRS 성능 결정에 원자로의 형상은 부차적인 인자임을 알 수 있다. 한편, 원자로 baffle을 통한 열전도에 의한 전열량은 시각 및 위치에 따라 크게 변하는데 대체적으로 전체전열량의 30% 이하의 크기로 나타났다.

잔열제거에서 궁극적으로 중요한 것은 노심 및 원자로내부 구조물의 건전성 확보인데 이는 지금까지 거론한 잔열제거 능력 자체 외에 원자로 내부 최고온도에 대한 검토가 필요하다. 원자로 내부의 최고온도는 잔열제거능력에 pool내부의 온도분포, 즉 고온pool과 저온pool간의 온도차이에 의하여 결정되며 이온도 차이는 노심의 붕괴열과 원자로 내부 유로(plpath)의 유량에 의하여 결정된다. 또한 이 유량은 내부유로(plpath)의 헤드 및 저항에 의하여 결정되는 데 그림 11은 내부유로의 유동저항 계수의 변화에 대한 것으로서 실제적으로 변할 수 있는 K의 폭 +-30%에 대하여 과도기시(그림2의 조건)의 노심 출구의 온도변화는 약 +-3C 정도가 됨을 보이고 있다.

그림 12은 원자로 pool의 체적 변화에 따른 과도기시의 최고온도 및 최고온도 도달 시각의 변화이다. 도시된 최고온도 도달 시각의 오차 폭이 비교적 큰 것은 PARS2-iB의 time step 크기가 온도변화율에 따라서 자동적으로 조정됨에 비하여 최고온도점 도달시의 온도 변화는 그림 2에 보여진바와 같이 상당히 완만하게 이루어지기 때문이다. 정량적으로는 체적의 +-30% 변화에 따른 최고온도의 변화는 +-6C 정도가 되고 있다.

이상의 결과 및 이전의 연구인 참고문헌[3]의 결과로부터 PSDRS 성능에 가장 큰 영향을 주는 요인은 pool의 평균온도, 전열면적, pool 체적, 그리고 복사면적의 표면계수로 정리된다.

#### 4. 결 론

이와 같은 연구를 통한 주요 결론은 다음과 같다. 1) KALIMER의 피동 잔열제거 계통인 PSDRS의 설계 해석을 위한 코드 PARS의 기능 및 전산 해석 algorithm을 개선시킨 PARS2-iB의 개발, 2)PSDRS내부의 전열모드의 정성적 및 정량적 특성 파악, 3) PSDRS 성능 결정의 우선 고려 대상 설계인자 및 부차적 고려 대상 설계인자의 파악, 4) PSDRS설계 해석 방법론 설정을 위한 기본 사항 파악.

#### <참고 문헌>

1. KALIMER Design Concept Report, 한국원자력연구소, KAERI/TR/-888/97, 1997.7
2. Y.S.Sim, M.H.Wi, Y.S.Kim, Y.C.Kim, M.Cho, Elevation Configuration of KALIMER Intermediate System, IAEA-TECDOC-907, IAEA, 1995
3. 위명환, 심윤섭, "액체금속로 피동원자로용기 냉각계통의 특성 분석", '96 춘계학술발표회 논문집, 1996
4. 심윤섭, 김연식, "소듐 관-통 형 열교환기의 교차류 열전달 해석 특성", '96 춘계학술발표회 논문집, 1996

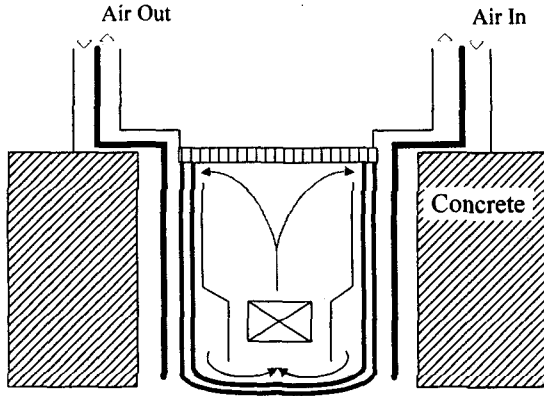


그림1. PSDRS 구조

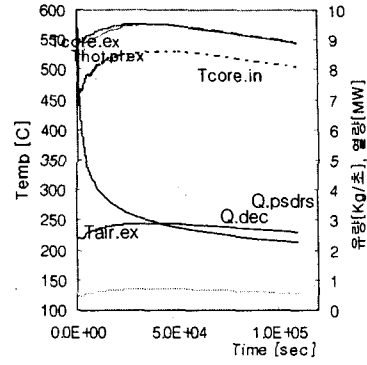


그림2. PSDRS 작동시의 거동특성

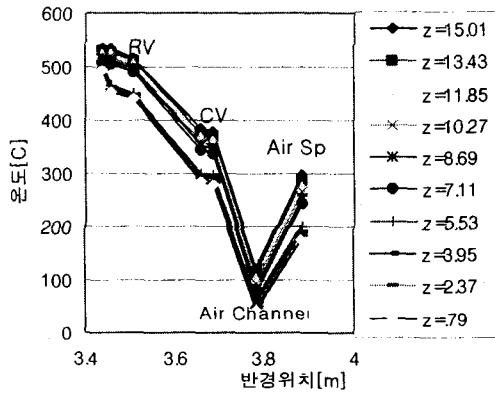


그림3. PSDRS 정상상태 온도분포

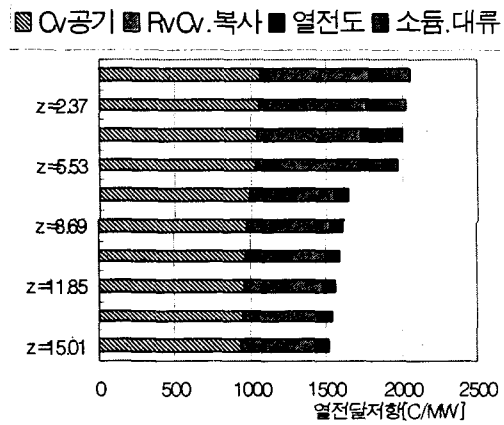


그림4. 높이별 열전달저항 분포

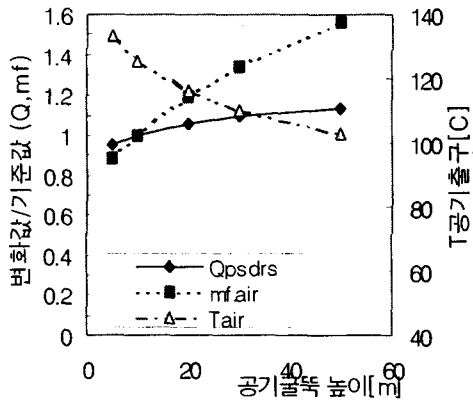


그림5. 공기굴뚝 높이 영향

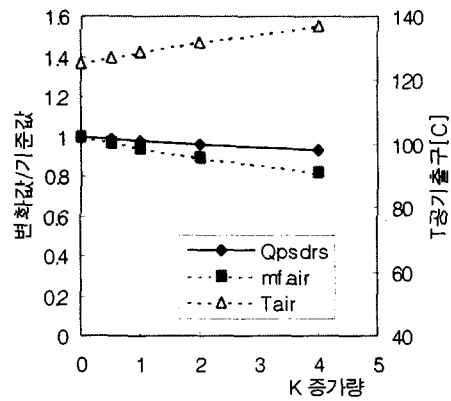


그림6. 공기유로 K 증가영향

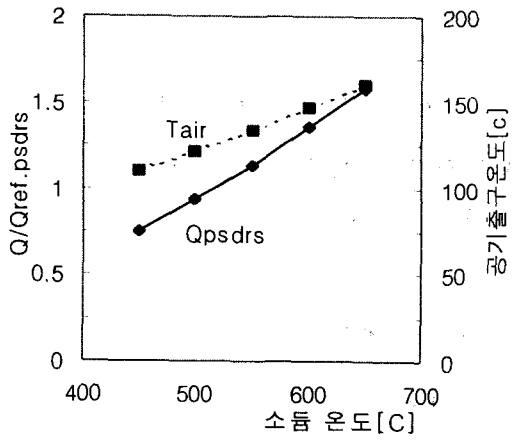


그림 7. 소름온도 변화 영향

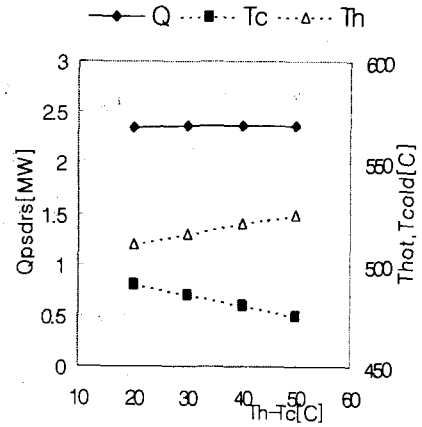


그림 8. 소름온도 분포 영향

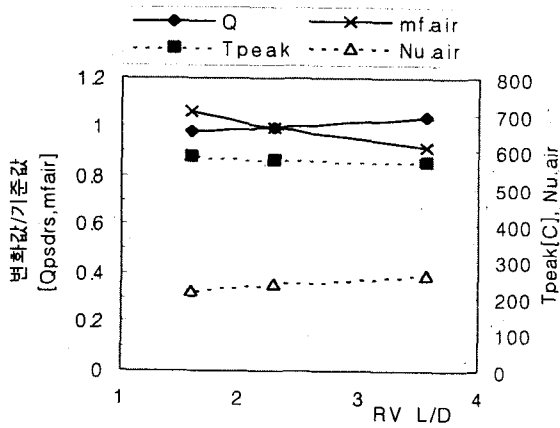


그림 9. 원자로 형상비 영향 (A전열-일정)

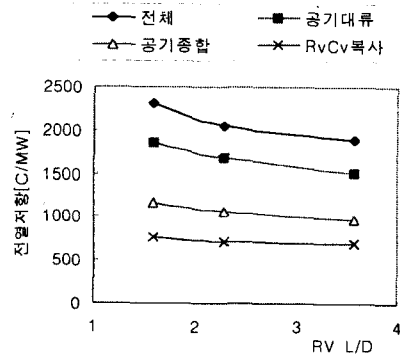


그림 10. 원자로 형상비와 전열 저항 (A전열-일정)

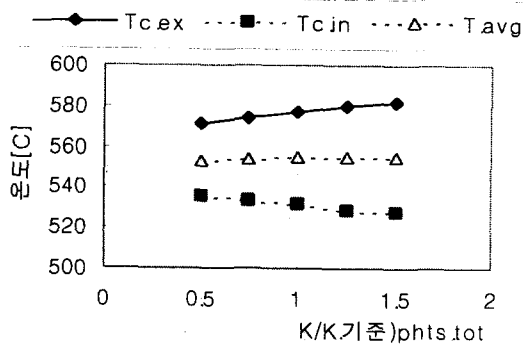


그림 11. Kphts와 과도기 최고온도

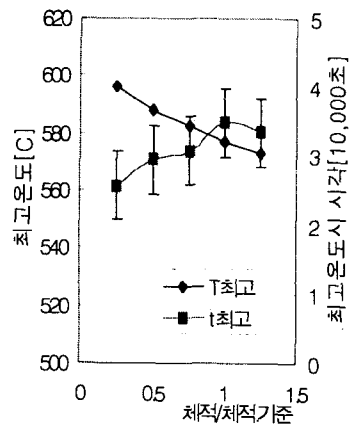


그림 13 Pool 체적과 과도기 최고온도