

KALIMER-600 원자로 헤드 및 상부구조물 복합 열전달 특성분석

전원대 a, 김성오 b

a 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, 액체금속로기술개발과제, ex-onedie@kaeri.re.kr

b 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, 액체금속로기술개발과제, sokim@kaeri.re.kr

1. Introduction

원자로 용기(RV) 및 관련 내부기기들을 지지하는 헤드가 고온으로 가열되면 크립피로 현상에 노출될 가능성이 있을 뿐만 아니라 원자로 헤드의 취약부분인 금속 및 비금속 밀봉물질의 건전성을 저해하게 된다. 따라서 원자로 헤드 열전달 특성분석을 CFX-4.4 를 이용하여 복사와 대류 및 전도의 복합적인 열전달 현상이 수반된 원자로 상부 구조물의 복합 열전달 문제를 3 차원으로 확장 해석하여 정상상태에서의 열특성을 해석하였다.

2. Methods and Results

해석의 물리적 범위는 수직방향으로는 고온 풀 소듐 표면에서 원자로 헤드까지, 반경방향으로는 원자로 용기 중심선에서 격납용기 사이의 공간을 해석영역으로 설정하였다. 또한 해석에 사용된 자료는 현재까지 진행된 설계인자[1]를 기준으로 전체적인 형상에 대한 열전달계수 및 유량을 KALIMER 격납 돔 냉각계통 해석을 위하여 설정하였던 방법론[2,3]을 따라 재해석하여 설정하였다.

2.1 Governing Equation and Boundary Conditions

본 해석은 원자로가 원통형구조물이므로 원통의 1/4 부분을 원통형좌표계를 이용하여 축대칭으로 대류 및 복사 열전달을 해석한다. 따라서 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 기본으로 해석공간의 헬륨유동의 자연대류 유동의 난류 특성까지 계산하기 위하여 Boussinesq buoyance approximation 을 사용하는 k-ε 모델을 수정한 RNG k-ε 모델[4]을 사용한다.

경계조건은 그림 1 에서 나타난 각 표면에 대해서 다음과 같이 적용하였다.

- 고온풀 표면 : 고온의 표면은 510°C의 온도로 일정하며 방사율은 0.3으로 적용한다.
- 격납용기 외부 : 230°C의 일정한 온도로 적용한다.
- 원자로 헤드 상부 : 격납돔 냉각계통에 의해 원자로 헤드 냉각계통의 작동 특성[2,5]을 고려하여 식(1)과 같이 열전달 계수를 설정한다.

$$h = \frac{k_{air}}{D_{II}} \times Nu = k_{air} \times (0.023 Pr^{0.4}) \times \left(\frac{Q}{\pi V} \frac{1}{r}\right)^{0.8} \quad (1)$$

- UIS 및 Pump, 격납용기, 원자로 배플, 원자로 용기, 원자로 헤드 등은 모두 Conducting Solid로 설정한다.
- IHX 와 DHX 의 경우에는 다른 계통과의 열전달을 하는데 이 부분의 모사 및 경계조건을 고려하기 어려워 해석공간에서 제외한다.

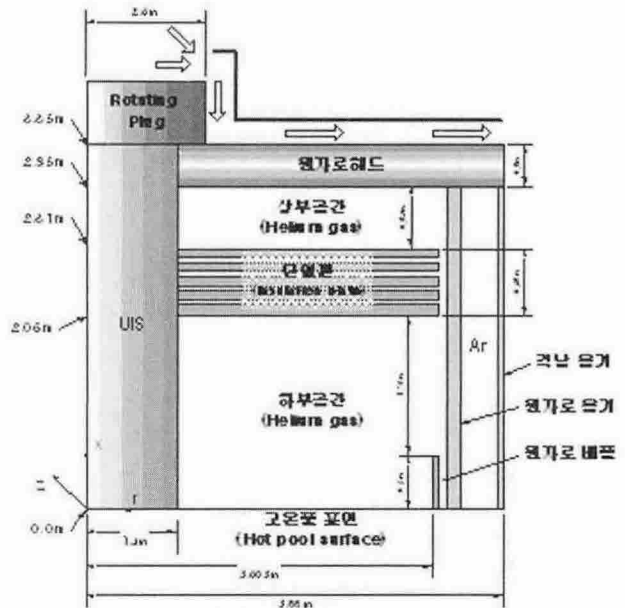


그림 1. 원자로 상부 해석영역 개략도

복사 열전달 모델은 CFX-4.4 에서 제공하는 'Monte Carlo 모델' 과 'Discrete Transfer 모델' 중에서 비교적 계산시간이 짧고 정확한 'Discrete Transfer 모델' 을 사용하여 복사 열전달을 계산한다.

2.2 Mesh Generation

CFX 에서 제공하는 3 차원해석 방법 중 축대칭 조건을 이용할 수 있는 r-θ 좌표계를 이용하여 형상을 생성하였는데 IHX, DHX 및 Pump 의 경우 모사 및 격자생성에 어려움이 있어 등표면적이 되도록 설정하여 IHX 와 DHX 영역의 경우는 위치에 맞게 배치하여 해석공간에서 제외하였다. 전체적인 격자의 수는 해석시간과 해석결과에 영향을 고려하여 14 만개를 생성하였다.

2.3 Result

그림 2 에서 나타난바와 같이 원자로 하부영역(①)에서는 고온풀의 영향으로 인해 고온의 영역이 크게 나타나고 절연판을 전후(절연판 하부-②, 상부-③)로 대류영역부분과 고체영역에서의 전도에 의한 부분이 크게 차이를 나타낸다. 원자로헤드 하부영역(④)에 이르러서는 전체영역이 150℃정도의 균일한 온도분포를 나타낸다. 절연판의 효과는 그림 3 에서 더욱 명확히 나타나고 있는데 해석영역 중앙에서 UIS 영역은 고체의 전도에 의한 열전달로 인해 높이에 따른 온도 분포가 거의 선형적으로 변하는 반면 유동장에서는 절연판아래는 고온풀의 영향으로 인해 대류와 복사에 의한 열전달로 인하여 하부공간 이 동일높이의 UIS 보다 고온을 나타내고 절연판 상부에서는 절열판의 열차단효과에 의해서 낮은 급격한 온도변화를 보이며 낮고 고른 온도 분포를 보이며 원자로 헤드의 건전성을 확보하고 있다.

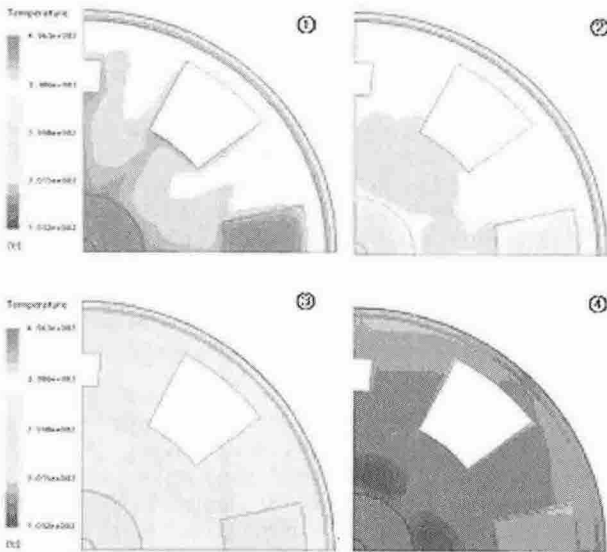


그림 2. 원자로 상부높이 위치에 따른 온도장변화

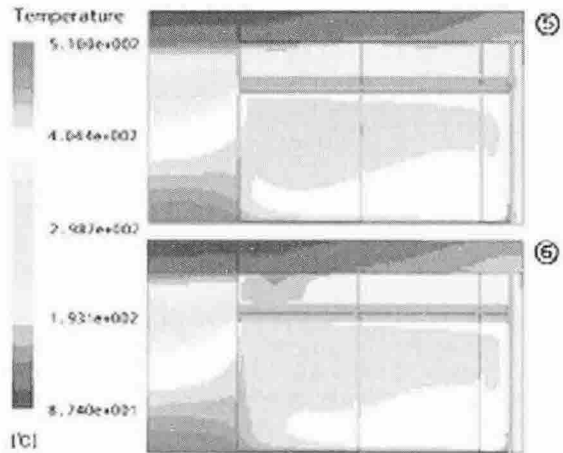


그림 3. 원자로 상부 각도에 따른 온도장 변화

3. Conclusion

원자로 상부 헤드부분의 대류 및 복사를 동반한 복합 열전달을 3 차원으로 해석하였고, 절연판의 열차단효과와 헤드 상부의 냉각계통의 유량을 증가시키므로써 원자로 상부 헤드부분의 건전성 확보를 확인하였다. 또한 절연판의 하부에서는 고온풀의 영향으로 인해 대류에 의한 열전달보다 복사에 의한 열전달효과가 현저히 크게 나타나고 절연판 상부에서는 복사에 비해 대류에 의한 열전달 효과가 크다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] Seong-0. Kim, KALIMER-600 원자로 상부 열전달 특성 분석 보고서, LMR/FS200-ER-02 Rev.0/2003 KAERI, Korea
 [2] Warren M. Rohsenow, Handbook of Heat Transfer Fundamentals, second edition, McGraw-Hill, 1985.
 [3] Seong-0. Kim, 격납 돔 냉각계통 개념설정 보고서, KALIMER/FS200-CN-02/2000 KAERI, Korea
 [4] CFX4.4 Solver manual, CFX international, UK, 1997.
 [5] J.P.Holman, Heat Transfer, Seventh edition, 1990.