

건식저장 핵연료집합체의 부수로 해석코드의 유동장 해석기법에 대한 분석

신창환, 양용식, 전태현

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

shinch@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 건식저장 시스템의 붕괴열은 사용후핵연료 안전성에 크게 영향을 끼친다. 따라서, 저장 중 사용후핵연료 피복관의 열화 및 그에 따른 손상을 막기 위해, 사용후핵연료의 건식저장 인/허가에서는 엄격한 피복관 온도 제한치를 설정하고 있다. USNRC의 사용후핵연료 피복관의 온도 기준은 건식저장 방식과 핵연료 장전 패턴에 무관하게 설정되기 때문에 사용후핵연료 집합체를 용기에 저장할 시에는 온도 기준을 만족하기 위한 집합체 구성이 요구되며 열해석을 통해 피복관 온도제한치의 만족 여부를 보이는 과정이 요구된다. 이에 사용후핵연료 건식저장 용기를 개발하기 위한 열해석 기술은 매우 중요한 인/허가 요건이며, 다양한 시험결과로써 검증된 방법론 및 코드 체계의 보유가 필수적이다.

USNRC에서 사용후핵연료 건식저장 시스템 열해석 코드인 COBRA-SFS는 노심 부수로 해석코드인 COBRA를 바탕으로 개발된 코드이다. COBRA-SFS는 사용후핵연료집합체, 금속 캐스크 및 콘크리트를 포함한 전체 열전달 해석을 수행할 수 있으며, 특히, 각 저장 시스템에 따라 다양하게 활용할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 다양한 시험을 통해 예측 성능 및 방법론적 검증이 완료된 코드이다.

현재, 국내에서도 경수로형 사용후핵연료를 건식저장하기 위한 본격적인 기술개발 연구가 수행되고 있으며, 건식저장 시스템에 대한 열해석의 필요성이 크게 대두될 전망이다. 이에 본 연구에서는 COBRA 및 COBRA-SFS의 주요 모델 및 코드구조를 비교/분석하여, 향후 진행될 건식저장 시스템 열해석기술에 활용하고자 하였으며, 특히 본 논문에서는, 건식저장 시스템 내부 충전기체의 유동과 압력장 해석에 대한 수치해법을 집중적으로 분석한 결과를 요약하였다.

2. 지배방정식

부수로 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫 번째는 질량보존식(mass conservation)이며, 두 번째는 운동량보존식(momentum conservation)으로 축방향 운동량(axial momentum)과 횡방향 운동량(transverse momentum)으로 나누어서 표현하며, 마지막으로 에너지 보존식(energy conservation)이다. 이들 기본 보존식 중 압력손실과 유동경계조건과 관련한 보존식은 다음과 같이 질량과 운동량 보존식이며, 두 코드간에 동일한 방정식이 사용되었다.

질량보존식:

$$A \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho \rangle_V + \frac{\partial}{\partial x} \langle \rho u \rangle_A A + \{D_c^T\} \langle \rho v \rangle_S S = 0$$

축방향 운동량 보존식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho u \rangle_V A + \frac{\partial}{\partial x} \langle \rho u^2 \rangle_A A + \{D_c^T\} \langle \rho u v \rangle_S S = & -A \frac{\partial}{\partial x} \langle p \rangle_A - \frac{1}{2} \left(\frac{f'}{D_h} + \frac{K}{\Delta x} \right) \langle \rho u^2 \rangle_A A \\ & - A \langle \rho \rangle_V g_z \cos \theta - C_T \{D_c^T\} [w'] [D_c] \{v'\} \end{aligned}$$

횡방향 운동량 보존식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho u \rangle_V S + \frac{\partial}{\partial x} \langle \rho u v \rangle_A S + C_s \{D_c\} \{D_c^T\} \left\{ N \frac{S}{l} \langle \rho v^2 \rangle_S \cos \Delta \beta \right\} \\ = \frac{S}{l} \{D_c\} \{ \langle p \rangle_A \} - \frac{1}{2} \frac{S}{l} K_G \langle \rho v^2 \rangle_S - \langle \rho \rangle_V g_z S \sin \theta \cos \beta \end{aligned}$$

3. 보존 상관식

지배 방정식의 계산을 위해서는 일부 변수에 대한 실험적 상관식이 필요하다. 축방향 운동량 보존식의 계산을 위해서는 마찰손실계수와 형상손실계수에 대한 상관식들이 필요하다. 마찰 손실계수는 일반적으로 레이놀즈수의 함수로 표현되며, COBRA-SFS는 난류에 대하여 $f = aRe^b + cRe^d + e$, 층류에 대하여 $f_l = a_l Re^{b_l} + c_l$ 의 형태를 사용하도록 한 반면, COBRA-IV에서는 층류와 난류에 $f = aRe^b + c$ 의 형태를 공통으로 적용하였다. 건식저장에서 대부분의 유동장은 층류영역에 포함되므로, 두 코드는 동일한 형태를 사

용하고 있다고 볼 수 있다. 실제로 COBRA-SFS의 검증에서 마찰손실계수는 $f = \frac{64}{Re}$ 를 사용하였다. 이때 마찰손실계수는 다시 가열벽근처의 점성을 보정하게 되는데 두 코드 모두 동일한 상관식을 적용하고 있다. 건식저장에서는 이상유동이 존재하지 않으므로, COBRA의 이상유동에 관한 마찰손실은 생략되었다. 또한 지지격자와 같은 형상에 의한 손실계수는 동일한 상관식 형태를 사용하였다. 난류혼합상관식은 단위길이당 횡방향 섭동으로 평균 축방향 질량유속에 대한 비로써 두 코드에서 4가지의 동일한 옵션을 선택하여 사용할 수 있다.

4. 수치해법

부수로 해석 코드인 COBRA-IV에서는 음해법(Implicit method)과 양해법(Explicit method)의 두가지 수치해법을 적용하고 있다. 대부분 정상상태의 부수로 해석에 사용되는 음해법의 경우 제한된 과도조건 해석이 가능하고, 축방향 유동은 항상 “양”의 값을 가져야 하고 횡방향 유동에 비해 항상 커야한다는 제한 조건이 있다. 반면 축방향 유동이 “음”의 값을 가지는 재순환 유동과 같은 과도상태의 계산을 위해서는 양해법인 ACE method를 기반으로 작성되었다. 이때 양해법의 초기조건은 음해법에서 구해진 해를 사용한다.

건식저장과 같이 자연대류가 지배하는 부수로 해석을 주목적으로 하는 COBRA-SFS에서는 RECIRC method를 사용하고 있다. 이러한 RECIRC method의 장점은 역류(reverse flow)와 재순환 유동(recirculation flow)이 존재하는 유동장 해석이 가능하다는 것이다. RECIRC method는 가설유동해(tentative flow solution)와 압력해(pressure solution)의 두가지로 나뉘어 진다. 가설유동해는 집합체의 입구부터 출구까지의 반복계산에 의해 구해지는데, 각각의 축방향계산을 위해서 축방향과 횡방향 유속은 현재의 압력값과 다른 변수들에 대한 두 개의 선형화된 운동량 방정식에 의해 평가된다. 모든 가설유동해가 축방향에 대하여 구해진 후에 유동과 압력이 보존식을 만족하도록 Newton-Raphson method에 의해 조정된다. 압력해를 통해 구해진 유동장의 결과는 축방향에 대한 엔탈피와 유체 물성 분포를 구하기 위해 사용된다. 구해지 물성치와 결과들은 출구부터 입구까지 역방향에 대한 계산을 수행하여 주어진 수렴조건에 도달할 때 까지 반복계산을 통해 최종해를 얻게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 건식저장과 같이 자연대류에 의해 냉각되는 핵연료의 부수로해석을 위한 COBRA-SFS와 핵연료 설계용 부수로 코드인 COBRA의 개선 사항 중 유동장 해석에 대한 차이점들을 분석하였다. 기본 지배방정식은 두 코드간에 동일한 식을 적용하고, 압력손실의 계산에 동일한 형태의 상관식을 사용함으로써 간단히 유동조건에 맞는 상관계수의 적용을 통해 계산이 가능하다. 반면 압력과 유동장 해석을 위해 수치해법에 큰 차이를 보이고 있다. 건식저장과 같이 밀폐된 공간내에서 자연대류해석에 수반되는 재순환유동에 대한 해법으로 기존의 COBRA의 수치해법인 음해법과 양해법은 제한을 받는다. 따라서 재순환유동에 더 적합한 RECIRC method가 COBRA-SFS에 사용되었다. 한국원자력연구원에서 개발한 부수로 해석코드인 MATRA는 COBRA와 같은 수치해법을 사용하고 있으므로, 이를 재순환유동 해석을 위한 수치해법을 적용하기 위해서는 보다 정밀한 분석과 개선작업이 필요하다.

참고문헌

1. Rector, D. R., Wheeler, C. L., and Lombardo, N. J. (1986): COBRA-SFS: A Thermal-Hydraulic Analysis Computer Code: Volume 1 - Mathematical Models and Solution Method, Pacific Northwest Laboratory, PNL-6049-Vol.1
2. Stewart, C. W., Wheeler, C. L., Cena, R. J., McMonagle, C. A., Cuta, J. M., and Trent, D. S. (1977): COBRA-IV: The Model and the Method, BATTELLE Pacific Northwest Laboratories, BNWL-2214.
3. 황대현, 서경원, 권혁 (2008): 부수로 해석코드 MATRA(Version 1.0) 검증 보고서, 한국원자력연구원, KAERI/TR-3639/2008