

단위바스켓 유동특성 평가

유승환*, 방경식, 이주찬, 최우석

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*shyu80@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후 핵연료를 수송, 저장하는 용기의 안전성 분석 보고서에는 반드시 열적 안전성 평가 항목이 포함되어야 한다. 정상조건 및 사고조건 일부에 대해서는 축소 모델이나 원형 모델의 시험으로 안전성 평가를 수행하지만, 시험 비용이 많이 소요되기 때문에 대부분의 경우에는 해석 결과로 시험을 대체한다. 핵연료 집합체는 구조가 매우 복잡하기 때문에 복잡한 형상을 해석하기 위해선 많은 모델링 시간과 해석 시간이 소요되고, 고성능 대용량 클러스터가 필수적이다. 수송 및 저장용기에는 다수의 사용후 핵연료 집합체가 장전되기 때문에 일반적으로 다공성 모델(porous media) 및 유효열전도도를 적용하여 집합체를 단순화하여 해석을 수행한다.

본 연구에서는 핵연료 집합체 한 다발을 포함하는 바스켓 내부의 유동만을 고려하여 다공성 모델의 상수(permeability)를 도출하는 방법을 검토하고자 한다. 또한 핵연료 집합체 한 다발을 상세 모델링 하여 유동 특성을 분석하고, 한 다발을 단순화 할 수 있는 단순화 모델을 제안한다. 제안한 모델로 다공성 모델의 상수를 계산 및 비교 평가하여 제안한 모델을 검증한다.

2. 본론

2.1 PLUS-7 사용후핵연료집합체 모델링

핵연료 집합체는 한다발씩 바스켓 내부에 장전이 되고, 바스켓 내부에서는 핵연료집합체의 붕괴열로 인한 자연대류로 하단에서 상부 쪽으로 유동이 발생하게 된다. 집합체를 구성하고 있는 복잡한 구조물로 인하여 전단응력이 발생하고, 이는 유동저항으로서 유속에 영향을 미친다.

핵연료집합체는 상하단 고정체를 제외하면, 핵연료 집합체에 지지격자가 반복적으로 배치되어 있다. 바스켓 내부에서 유동저항을 평가하면, 내부 유체가 지나갈 수 있는 영역의 크기에 반비례하여 유동저항이 증가할 것이다. 전체 유동저항의 크기

를 고려하면 상단 고정체와 하단 고정체는 높이가 집합체와 지지격자에 비해 상대적으로 작기 때문에 전체 유동저항 크기에 영향이 미비하다고 가정하고, 유동저항을 평가할 때에는 상하단 고정체를 고려하지 않았다. 본 해석에서의 집합체 모델링은 Fig. 1과 같다.

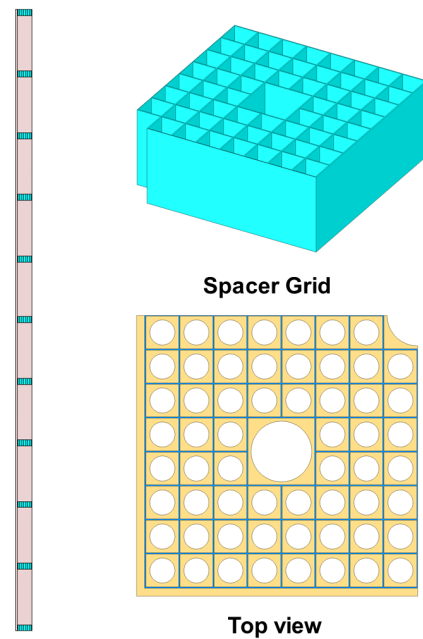


Fig. 1. Modeling of PLUS-7 fuel assembly.

2.2 내부 유동특성 평가

바스켓 내부의 핵연료 집합체의 붕괴열로 인하여 하단에서 상부로 자연대류 유동이 발생한다. 본 해석에서는 자연대류를 고려하지 않고, 하부에서 일정한 유속(0~0.1 m/s)으로 상단으로 흐르는 층류 강제대류 유동으로 대체 해석하였다. 높이에 따른 압력강하는 거의 선형적으로 나타나고 있고, 평균 유속은 주기적인 패턴을 나타내지만, 높이에 따라 평균 유속의 차이는 거의 없다. 압력강하가 선형적으로 나타나는 것은 높이에 따라 형상이 반복되어 벽에서 발생하는 유동저항이 일정하다는 것이다. 그리고 높이에 따라 압력계수가 선형적이기 때문에 다공성 모델에서 관성저항을 무시할 수 있고, 이러한 유동을 단순화에는 점성저항계수만 계산하면 될 것이다.

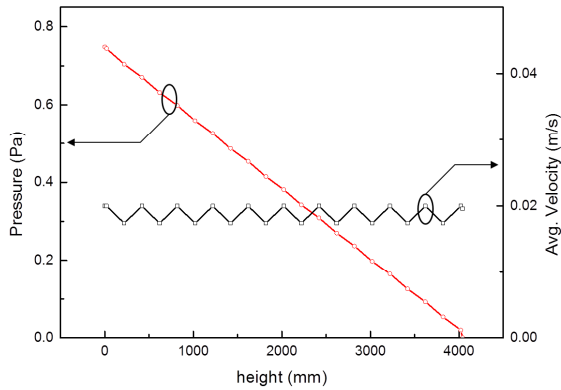


Fig. 2. Avg. static pressure and velocity with according to height.

2.3 점성저항계수 평가

핵연료집합체를 단순화하는 다공성 모델의 대표 계수인 점성저항계수를 비교 평가하였다. 점성저항 계수는 표 1과 같이 이론적인 접근으로 마찰계수 방법, 수치해석을 통하여 전단응력 및 압력강하량으로 계산이 가능하다.

Table 1. Viscous resistance parameter

Method	Friction factor	Wall shear stress	Pressure drop
Viscous resistance parameter	$\frac{32}{D_h^2}$	$\frac{4\tau_w}{\mu V D_h}$	$\frac{\Delta P}{L\mu V}$

계산결과는 Table 2와 같다. 두 번째, 세 번째 결과는 거의 비슷하지만, 첫 번째 결과는 다른 두 값 대비 약 50% 작게 계산되었다. 그 이유는 마찰계수를 적용하기 위한 과정에서 도입한 관내 층류 유동이라는 가정 때문인 것으로 보인다. 특성길이를 계산하여 형상 정보는 반영되지만, 바스켓 내부에서의 격자의 복잡한 형상으로 생성되는 전단응력 및 유동저항에 의한 압력 강하 등이 고려되지 않는다. 따라서 그 값은 작게 계산될 수밖에 없다.

Table 2. Viscous resistance parameter calculations

Method	Friction factor	Wall shear stress	Pressure drop
Viscous resistance parameter	2.36E+05	5.17E+05	5.34E+05

3. 결론

핵연료집합체 한 다발을 포함하고 있는 바스켓 내부의 유동을 수치해석을 통하여 계산하였으며, 유동 특성을 분석하였다. 입구 영역에서 유동이 발달함에 따라 유동저항이 상대적으로 크게 발생하였지만, 입구 영역의 길이가 집합체의 길이보다 아주 작기 때문에 전체적인 압력강하에 미치는 영향은 미미하게 나타났다.

다공성 계수의 세 가지 방법으로 다공성 모델 계수의 점성저항계수를 비교 평가하였다. 첫 번째는 관내 유동이라 가정을 통한 이론적인 방법으로 두 번째는 전단응력으로, 세 번째는 압력강하량으로 계산하였다. 두 번째, 세 번째 결과는 거의 비슷하지만, 첫 번째 결과는 다른 두 값 대비 약 50% 작게 계산되었다. 그 이유는 특성길이를 계산하여 형상 정보는 반영되지만, 바스켓 내부에서의 격자의 복잡한 형상으로 생성되는 전단응력 및 유동저항에 의한 압력 강하 등이 고려되지 않기 때문에 작게 계산될 수밖에 없다고 판단된다.

4. 감사의 글

본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)가 주관하는 방사성폐기물기술개발 사업의 지원으로 수행됨 (20147102173B).

5. 참고문헌

- [1] Ansys, Ansys 15.0 User guide(2015).
- [2] E. R. Lindgren and S.G. Durbin, "Laminar hydraulic analysis of a commercial pressurized water reactor fuel assembly", NUREG /CR-7144(2013).