

평행 다수로 문제에 대한 부수로 해석 코드 MATRA 적용

서경원^a, 한규현^b, 황대현^a, 이정찬^a, 지성균^a

^a 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150 한국원자력연구소, nulmiso@kaeri.re.kr

^b 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과

1. 서론

각 집합체가 독립된 채널을 이루고 있는 신형 원자로나 고온가스 냉각 원자로(HTGR), 또는 초임계압 원자로(SCR)의 노심은 기존 경수로의 노심과 확연히 구분되는 특징들을 가지고 있다. 기존의 경수로 노심의 집합체들이 서로 개방되어 있어서 집합체와 집합체 또는 부수로와 부수로간에 냉각재의 유동혼합이 발생하는 것과 달리 독립된 평행 다수로 노심에서는 각 집합체가 독립적인 채널을 형성하며 채널간에 교차유나 유동혼합이 발생하지 않는다. 이러한 독립된 평행 다수로 노심에서의 채널별 유량 분포는 각 채널에서 발생하는 압력강하에 의해 결정된다.

본 연구에서는 독립된 평행 다수로 노심에서 입구유량과 출구압력을 알지만 노심 압력강하량을 알 수 없을 때, 계산된 압력강하를 기준으로 각 채널별 유량이 재분배되도록 하는 기능을 MATRA 코드[1]에 구현하였다. 또 새로운 MATRA 코드의 기능을 고온가스의 출력분포에 따른 채널별 유량분포 실험과 관다발형 집합체로 이루어진 신형원자로 노심에 적용하고 그 결과를 분석하였다.

2. 평행 다수로 모형 개발 및 결과

2.1 MATRA 코드 수정

MATRA 코드의 부프로그램 SCHEME 에서 축방향으로의 지배방정식 계산이 끝나면 압력강하 경계조건 처리 부프로그램인 PBOUND 를 호출한다. PBOUND 에 각 채널의 압력강하량으로부터 채널별 유량을 재분배하는 기능을 추가하였다. 노심 평균 압력강하량을 계산하여 평균 압력 강하 보다 큰 압력강하가 발생한 채널의 유량은 감소시키고 반대의 경우엔 증가시키되 축방향에 대해서 반복계산시에 유량이 진동 발산할 수 있으므로 적절한 보정인자를 사용하였다.

2.2 수냉각 신형로 노심 열수력장 해석

수직 관다발형 집합체로 이루어진 신형원자로에 대한 정상상태 열수력장 해석에 MATRA 코드를 적용하였다. 이 원자로의 노심은 서로 독립적인 원관 형태의 집합체로 구성되어 있어서 집합체간의 유량 재분배가 없으므로

집합체별 입구 유량 분포는 열적 여유도에 직접적으로 비례한다. 집합체별 유량 분포는 집합체 입구에 설치된 입구 오리피스의 압력 손실 계수를 다르게 하여 조절된다. 연료 집합체는 노심에 장전되면 주기말까지 동일한 위치에서 연소되므로, 운전기간 중에 집합체별 유량 분포를 조절할 수 없다. 따라서 1-차원 평행 다수로 해석을 통해서 전체 운전 기간 동안 노심 출력 분포와 기하 형태, 운전 조건 등을 고려하여 비등 여유도를 최대한 확보할 수 있도록 집합체별 유량 분포를 결정하였다. 즉, 출력이 높은 집합체에 많은 유량을 출력이 낮은 집합체에 적은 유량을 보내도록 입구 오리피스 계수를 결정하였다.

이러한 평행 다수로 노심에 대해서 MATRA 코드 해석을 수행하고 그 결과를 1-차원 평행 다수로 해석 결과와 비교하였다. 그림 1 은 노심 침투 출력치 분포와 노심 평균 질량유속에 대한 집합체별 상대 질량유속을 노심 반경방향에 대해서 나타낸 것이다. 집합체별 유량분포가 출력분포의 경향과 비슷하게 나타났는데, 이것은 높은 출력의 집합체에 많은 유량이 흐르도록 설계된 것을 의미한다. MATRA 코드 해석에 의한 유량분포와 1-차원 해석에 의한 유량분포의 차이가 $\pm 3\%$ 이내로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

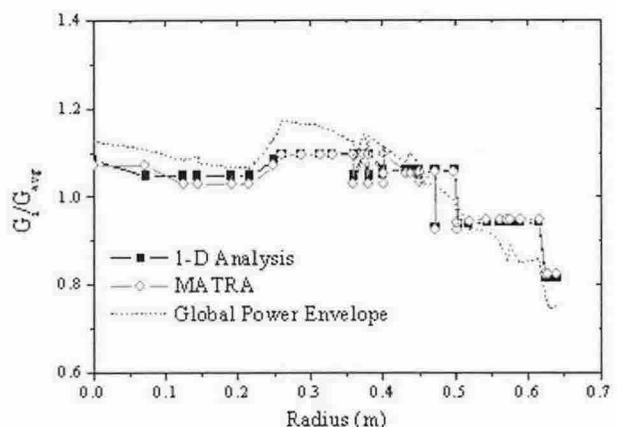


그림 1. 평행 다수로 노심 유량분포 해석

2.3 고온가스로 실험자료 분석

MATRA 코드의 압력강하에 따른 유량분배 계산 성능을 검증하기 위해서 HENDEL 실험루프의

채널별 유량분포 실험결과[2]와 비교하였다. HENDEL 실험루프는 고온 헬륨 가스로의 열수력적 성능을 실험하기 위한 장치로서 시험부는 12 개의 연료봉으로 구성된 집합체이며, 12 개의 연료봉은 각각 12 개의 독립된 채널을 형성한다. 흑연블록에 드릴로 가공된 채널의 내경은 53mm 이고 연료봉의 외경은 46mm 이다. 하나의 집합체는 단면이 육각형인 570mm 높이의 집합체 7 개가 수직으로 쌓인 형태이다. 해석 대상 실험은 입구 레이놀즈수 10,000, 유량은 275g/s, 입구 온도 270℃, 입구 압력 3.9MPa, 평균 열입력 47.7kW 조건에서 수행된 #725~#731 실험으로 6 번 연료봉의 출력을 평균 열출력의 0~1.5 배로 바꾸면서 수행한 것이다.

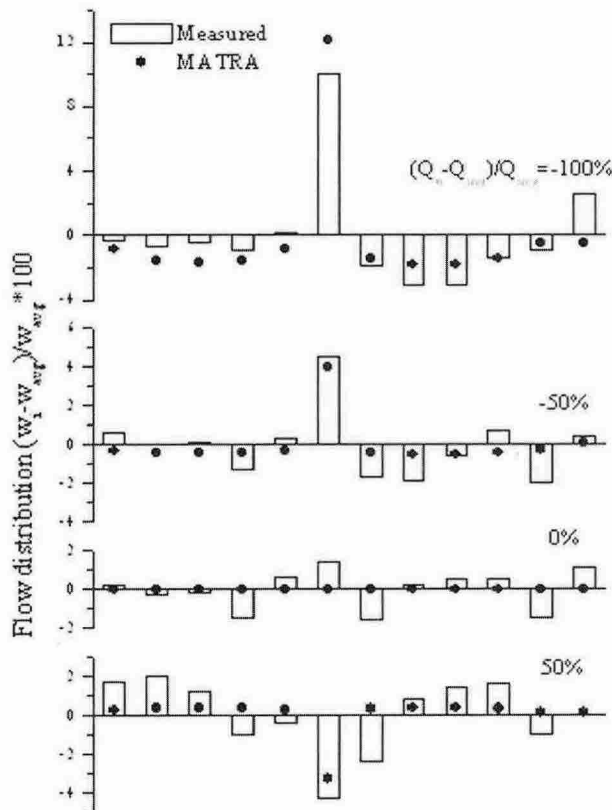


그림 2. HENDEL 실험루프 채널별 유량분포

그림 2 에 HENDEL 에서 수행된 유량분포 실험 결과와 MATRA 해석 결과를 나타냈다. 연료봉 6 번의 출력을 0kW 로 하였을 때, 6 번 채널의 온도가 다른 채널들에 비해서 낮으므로 압력 강하가 작게 발생하므로 6 번 채널의 유량이 10% 이상 증가하고 다른 채널들의 유량은 조금씩 감소한 것을 알 수 있다. 연료봉 6 번의 출력을 평균 출력의 50%로 하였을 때도 6 번 채널의 유량이 4% 가량 증가하고 다른 채널의 유량은 감소하는 추세를 보여주고 있다. 반대로 연료봉

6 번의 출력을 평균 출력의 150%로 하였을 때에는 6 번 채널의 헬륨 온도가 증가하면서 6 번 채널의 유량이 평균 유량에 비해 4% 가량 적고 다른 채널들의 유량이 증가하는 추세를 보이고 있다. 마지막으로 모든 연료봉의 출력을 평균 출력으로 하면 MATRA 코드의 해석은 모든 채널의 유량이 동일한 것으로 나타나지만, 실험 결과는 채널별로 ±1.5% 정도의 차이를 보이는데, 연료봉별 출력분포와 피토크를 사용한 채널 평균 유속 측정 등의 실험오차로 판단된다.

고온가스로 12 채널 유량분포 실험에 적용한 MATRA 코드 해석결과는 실험의 유량분포 경향을 잘 예측하였고 MATRA 코드의 유량재분배 기능이 잘 작동하는 것으로 나타났다.

3. 결론

부수로 해석 코드인 MATRA 에 평행 다수로 노심에서 발생하는 평균 압력 강하로부터 채널별 유량을 재분배하여 반복 계산하는 기능을 구현 하였다. 평행 다수로 이루어진 실험원자로의 노심 열수력장 해석에 MATRA 코드를 적용하고 이를 1-차원 해석 결과와 비교하였다. MATRA 코드의 해석 결과와 1-차원 해석 결과가 잘 일치하였고, 출력분포에 따른 유량 재분배 경향을 잘 예측하는 것으로 나타났다. MATRA 코드를 12 개의 평행한 채널로 구성된 고온가스로 집합체의 채널별 유량분포 해석에 적용하였다. 그 결과 MATRA 코드가 채널별 출력분포에 따른 유량재분배 경향을 잘 예측하고 해석결과가 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다.

이로부터 MATRA 코드에 추가한 유량 재분배 모형이 평행 다수로의 특징을 가진 실험 원자로, 고온가스로나 초임계압경수로 등의 차세대 원자로 노심해석에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 일체형원자로 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 유연중, 황대현, Development of a Subchannel Analysis Code MATRA (Ver. a), KAERI/TR-1033/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [2] Maruyama et al., Experimental Studies on the Thermal and Hydraulic Performance of the Fuel Stack of the VHTR, Nucl. Eng. and Des., Vol.102, p.11, 1987.