

SMART 일차냉각재계통 내 난류 모형 검증
(Turbulent Model Verification for Primary Coolant System of SMART)

Kun Ho Chun, Han Young Yoon, Young Dong Whang, Hee Chul Kim, and Sung Quun Zee
KAERI, 150 Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, ex-khchun@kaeri.re.kr

1. 서론

SMART 일차냉각재계통 유로는 주냉각재펌프, 증기발생기, 원자로 하향유로, 노심하부, 노심 및 노심지지원통을 지나 주냉각재펌프로 순환하는 일체형 유로이다. 일차냉각재계통 내에 에너지 전달은 냉각재에 의하여 이루어지기 때문에 냉각재의 3 차원 열-유동 해석은 중요하다. 특히, SMART 원자로 일차냉각재계통 성능해석을 1 차원적으로 접근하기 어려운 영역이 있다. 이것은 3 차원 열-유동 특성을 1 차원으로 해석할 때 나타난다. 특히, 대류열전달, 자연대류, 유동의 비대칭성과 불안정성, 냉각재 및 열 혼합, 원자로 기하학적 특성으로 발생하는 유체 현상 등에 대한 정보는 1 차원적으로 구현하기 어려운 경우가 많다. 따라서 성능해석 코드는 3 차원 열-유동 해석 코드와 더불어 해석하는 것이 보다 이상적이다.

본 연구 목적은 일체형원자로 성능해석 코드 TASS-3D 개발과 연계된 SMART 원자로집합체 일차냉각재계통 유로 내에 3 차원 열-유동 해석을 위한 난류 모형의 적용 및 검증이다. 검증될 난류 모형은 선행 연구인 기술보고서 "KAERI/TR 2540/2003, SMART-P 의 3 차원 열-유동장 해석을 위한 비균질 V2F 난류 모형 개발"에서 선정된 표준 고레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모형이 해석 및 검증의 대상이다. 냉각재 열-유동 해석은 전출력 운전, 자연순환(자연대류) 운전, 주냉각재펌프(MCP) 1 대 정지 운전 그리고 증기발생기(SG) 2 구역 격리 운전 등에 대하여 수행한다.

2. 전산해석

본 연구에서는 비압축성 지배방정식을 격자중심식 유한체적법을 사용하여 이산화하였다. 유한체적법에서는 계산 공간을 정렬격자와 비정렬격자로 분할하여 각각의 계산 셀에 대하여 지배방정식을 적분한다. 속도와 압력은 시간 진행을 2 단계로 나누어 정확도를 높이고 MAC 해법에서 포아송방정식을 간략화시킨 SMAC 알고리즘을 이용하였다. 집중격자계를 사용하여 이산화하면 국부적으로 압력진동해가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 운동량선형 보간법이나 압력완화법을 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 Rhie & Chow 가 제안한 운동량선형 보간법을 적용하였다.

격자생성은 TASS-3D 의 다른 프로그램과 연계를 고려하여 격자수를 줄이는 방법을 적용하였다. 즉, 형상의 단순화와 유동의 이상화를 적용하였다. 형상의 단순화는 곡률을 직선으로 처리하고 복잡한 형상을 다공매질 등으로 처리하는 것이다. 유동의 이상화는 노심 및 증기발생기와 같이 주유동속도가 이차유동 보다 작기 때문에 그리고 국부적인 공간에서 반경방향과 원주방향으로 확산이 큰 의미가 없는 경우 주유동방향의

격자만 생성하고 반경방향으로 단일 격자를 생성하는 것을 의미한다.

냉각재 열-유동해석을 위한 난류모형은 표준 고레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모형이다. 이 모형의 선정은 두가지 이유에서 이다. 첫째는 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모형보다 격자수를 상당히 줄일 수 있기 때문이다. 둘째는 길이특성과 속도특성 성분이 모두 이론적으로 유도되어 복잡한 유동장에서 좋은 결과를 예측하고 난류운동에너지와 소멸율이 경계조건에 의하여 구현되기 때문에 수치해석적으로 안정하다.

3. 결과 및 고찰

냉각재 열-유동 해석은 4 가지 운전 조건에 대하여 온도, 압력, 속도, 난류강도, 스칼라속도 등을 조사하였다. 격자생성 과정에서 형상을 단순화하였기 때문에 비록 유동장 전체에 난류 모형이 적용되었지만 국부적으로 난류 특성이 나타나지 않는 영역이 있다. 따라서 난류 모형 검증은 3 차원 유동 특성이 잘 나타나는 원자로집합체 하향유로 위주로 조사되었다.

냉각재 열-유동 결과의 주요 특징을 살펴보면: (1) 자연순환 운전이 전출력운전에 비하여 유량이 13% 로 그림 1 에서 보는 것과 같이 상부환형 공동(R11), 노심상부 내각(R5) 그리고 증기발생기 우회유로(R15) 에서 유동의 정체현상으로 대류보다 확산 영향이 강하게 나타났다. (2) 주냉각재펌프 1 대 정지운전에서 MCP-A 를 정지시킨 경우 대부분의 유량이 MCP-B 로 유입되지만 유동분배관 효과로 SG1/4 구간과 SG2/4 구간의 유량차이는 1.3kg/s 으로 나타났다. 증기발생기 2 구간 격리 운전에서 격리된 SG1/4 구간과 정상 SG2/4 구간의 유량은 6.17 kg/s 차이를 보였다. 이것은 MCP 1 대 정지 운전의 유량이 증기발생기 2 구간 격리운전에 비해 33%인 것에 비하면 약간 높은 것이다. (3) 주냉각재펌프 1 대 정지운전에서 SG1/4 구간과 SG2/4 구간의 온도차이는 2.8°C 이고 증기발생기 2 구간 격리운전에서 17.9°C 로 나타났다(그림 5). 이것은 증기발생기 2 구간 격리운전에서 유량보다 온도에서 양극화 현상이 더 큰 것을 의미한다.

난류 모형과 격자 생성의 타당성을 조사하기 위하여 원자로 하향유로의 레이놀즈수와 제 1 격자점의 무차원거리 조사에서, 전출력 운전과 증기발생기 2 구역 격리 운전의 레이놀즈수는 각각 255000 과 267000 을 보였다(표 1). 이런 높은 예측은 해석 격자의 기하학적 형상을 간략화하면서 차폐체 등을 고려하지 않았기 때문인 것으로 나타났다. 자연대류 운전의 경우 레이놀즈수는 27000 그리고 MCP 1 대 정지는 75000 으로 조사되었다. 제 1 격자점의 평균 무차원거리는 자연대류인 경우만

대수영역에 위치하는 것을 확인하였으며 다른 세 운전 조건은 대수영역을 벗어났다. 이것은 주냉각재펌프가 1 대 이상 가동되는 경우, 하향유로의 제 1 격자점을 벽면에 더 가까이 생성시켜야 함을 의미한다. 하향유로에서 평균 와점성계수는 자연대류 180 그리고 전출력에서 1249 로 나타났다. 소멸에 대한 생성율의 비는 자연순환 조건인 경우 0.537 로 4 가지 운전 조건 중 가장 높게 예측하였으며 레이놀즈수가 높을수록 낮게 예측되었다. 난류강도는 4 운전 조건에서 0.052~0.067 로 비슷한 값을 예측하였다.

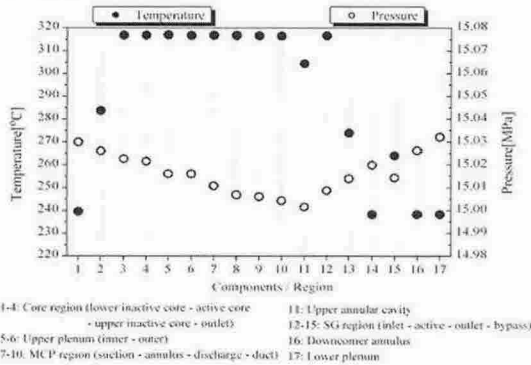


그림 1 자연순환 운전: 각 영역별 평균 압력-온도

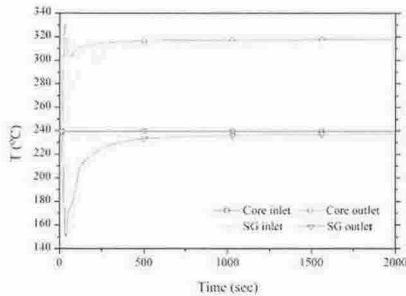


그림 2 자연순환 운전: 노심 입출구 및 증기발생기 입출구 온도

표 1 원자로 하향유로에서 난류 특성

	전출력	자연대류	MCP 1 대 정지	SG2 구역 격리
Q	360.5	45.8	111.8	360.0
Re	255,000	27,000	75,000	267,000
y^+	1844	253	597	1864
U	0.22	0.027	0.068	0.22
ν^+	1249	181	504	1310
P_k/ε	0.327	0.537	0.373	0.332
T_i	0.052	0.071	0.067	0.0526

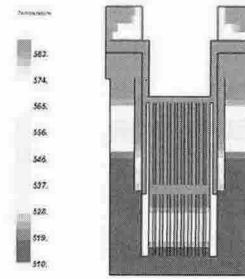


그림 3 자연순환 운전: 온도분포

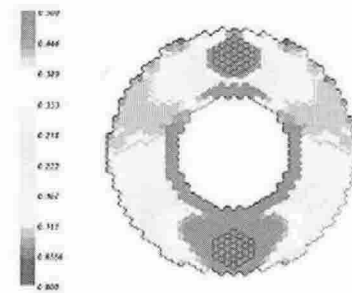


그림 4 MCP 1 대 정지 운전: MCP 주위의 스칼라속도장도

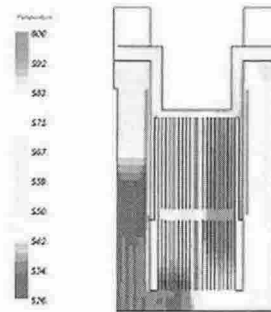


그림 5 SG 2 구역 격리 운전: 온도 양극화 현상

참고문헌

[1] KAERI/TR-2142/2002, "Basic Design Report of SMART, KAERI" 2002.
 [2] KAERI/TR-2540/2003, "Development of Inhomogeneous V2F Turbulence model of 3D Flow Anagnosis of SMART-P," KAERI, 2003.
 [3] Durbin P.A., 1991, "Near wall turbulence closure modeling without damping function", Theoret. Comput. Fluid Dyn. Vol.3, pp.1-13.
 [4] B. E. Launder, and D. B. Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.3, 269-289(1974).
 [5] B.E. Launder and B. I. Sharma, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc," Letters in Heat and Mass Transfer, Vol.1(1974), No.2, pp.131-138