SMART 유동혼합헤더집합체 열혼합 특성 해석

김 영 인,* 배 영 민, 정 영 종, 김 긍 구
한국원자력연구원

CFD ANALYSIS FOR THERMAL MIXING CHARACTERISTICS OF A FLOW MIXING HEADER ASSEMBLY OF SMART

Y.I. Kim*, Y.M. Bae, Y.J. Chung and K.K. Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART adopts, very unique facility, an FMHA to enhance the thermal and flow mixing capability in abnormal conditions of some steam generators or reactor coolant pumps. The FMHA is important for enhancing thermal mixing of the core inlet flow during a transient and even during accidents, and thus it is essential that the thermal mixing characteristics of flow of the FMHA be understood. Investigations for the mixing characteristics of the FMHA had been performed by using experimental and CFD methods in KAERI. In this study, the temperature distribution at the core inlet region is investigated for several abnormal conditions of steam generators using the commercial code, FLUENT 12. Simulations are carried out with two kinds of FMHA shapes, different mesh resolutions, turbulence models, and steam generator conditions. The CFD results show that the temperature deviation at the core inlet reduces greatly for all turbulence models and steam generator conditions tested here, and the effect of mesh refinement on the temperature distribution at the core inlet is negligible. Even though the uniformity of FMHA outlet hole flow increases the thermal mixing, the temperature deviation at the core inlet is within an acceptable range. We numerically confirmed that the FMHA applied in SMART has an excellent mixing capability and all simulation cases tested here satisfies the design requirement for FMHA thermal mixing capability.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 유동혼합(Flow Mixing), 열혼합(Thermal Mixing), 하향수로(Downcomer), 유동혼합헤더집합체(Flow Mixing Header Assembly), 원자로(Nuclear Reactor), 노심유동(Core Flow)

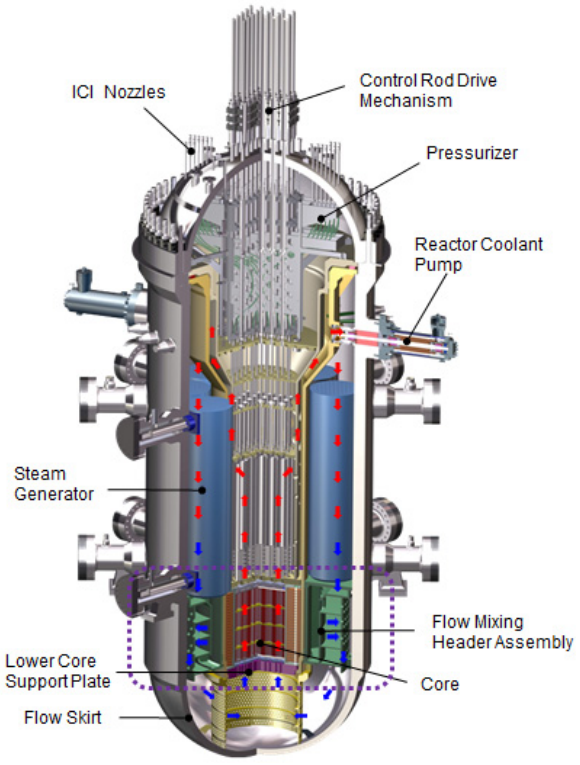
1. 서 론

SMART는 1997년부터 한국원자력연구원 주관으로 개발을 시작하여, 2012년 표준설계인가를 획득한 소형 일체형 원자로(integral reactor)이다. SMART 원자로용기 내부에는 핵분열에 의해 열에너지를 생산하는 노심(핵연료)이 위치한다. 노심은 원전 안전의 핵심으로서, 새로운 원자로 개발 시에는 다양한 조건에서 노심 건전성을 확인하기 위한 해석 및 실험을 수행한다[1-7]. 또한 노심 건전성을 보장함에 있어 노심의 온도 및 유동은 가장 큰 관심사항 중의 하나이다[8-10].

Received: January 21, 2015, Revised: March 24, 2015, Accepted: March 24, 2015.
* Corresponding author, E-mail: yikim3@kaeri.re.kr
DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.1.084
ⓒ KSCFE 2015

SMART에는 사고를 포함한 다양한 조건에서도 노심으로 유입되는 온도를 균일하게하기 위해 원전 최초로 유동혼합헤더집합체를 개발 도입하였다[11]. 유동혼합헤더집합체는 증기발생기와 노심 입구 사이 유로에 설치된다. 증기발생기로부터 불균일한 온도의 냉각수(원자로냉각재)가 방출되는 경우, 유동혼합헤더집합체는 유동 방향을 원주방향으로 바꾸면서 미세유동으로 세분화하여 온도가 다른 냉각수 사이의 접촉면적을 획기적으로 증대시켜 온도차를 소멸시키는 개념을 적용하여 개발되었다. 이러한 유동 재분배 특성은 원자로냉각재펌프나 증기발생기에서 유량 편차가 발생하는 경우에 유량 편차를 소멸시키는 효과도 있다.

SMART 개발과정 중에 정상조건을 비롯해 다양한 비정상 운전조건에서 노심 입구의 유동분포에 대한 해석 및 시험이 수행되었으며[12-14], 다양한 조건에서도 노심 입구 및 증기발생기의 유동분포가 비교적 균일함이 확인되었다.



(a) Reactor vessel

(b) Flow mixing heater assembly

Fig. 1 Configuration of the reactor vessel and FMHA of SMART

이와 병행해 다양한 조건에서 노심 입구 온도분포를 확인하기 위한 유동혼합헤더집합체 특성시험이 수행되었다[11]. 원자로냉각재펌프 이상으로 발생하는 유량변동은 증기발생기의 유로저항에 의해 소멸되어 증기발생기 사이에는 유량편차가 거의 발생하지 않았으므로[12,14], 유동혼합헤더집합체 특성시험에서는 증기발생기 이상조건만 고려하였다. 시험은 헤더 원주방향으로 불균일한 유량 방출특성을 갖는 초기 설계안와 비교적 균일한 유량 방출특성을 갖는 개선된 설계안 두 가지에 대해 특성시험을 수행하였으며, 증기발생기의 다양한 조건에서 온도분포를 측정하여 유동혼합헤더집합체의 특성을 확인하였다.

본 연구에서는 SMART의 1/5 크기로 유동혼합헤더집합체, 노심, 관련 구조물들을 모사하여 시험[11]에서 확인하지 못한 세부적인 열혼합 특성을 확인한다. 유동혼합헤더집합체는 특성시험에서 수행된 두 가지 형상에 대해 간략히 비교하고, SMART에 선정된 형상에 대해 집중 해석한다.

2. SMART 원자로 및 유동혼합헤더집합체

Fig. 1(a)는 SMART 원자로용기 및 내부구조를 보여주고 있다. SMART는 원자로 노심(Core), 증기발생기(SG, 8대), 가압기(Pressurizer), 원자로냉각재펌프(RCP, 4대), 유동혼합헤더집합체(FMHA) 등의 주요기기가 하나의 원자로용기 내부에 배치되는 일체형 원자로이다. 이에 따라 SMART는 상용 분리형 원자로의 단점중의 하나인 대형냉각재상실사고를 원천적으로 배제하는 특성을 갖는다.

원자로냉각재계통 유로는 노심 출구, 원자로냉각재펌프, 증기발생기, 유동혼합헤더집합체, 노심 입구 순으로 형성된다. 원자로냉각재펌프에 의해 원자로냉각재가 순환되며 노심에서 생성된 열이 증기발생기로 전달된다. 증기발생기는 원자로냉각재계통과 2차계통의 경계를 형성하며, 증기발생기 전열관 바깥쪽으로 원자로냉각재가 흐르고 안쪽으로 급수가 공급되어 증기가 방출된다. 유동혼합헤더집합체는 증기발생기 하부에 설치되며, 증기발생기 또는 원자로냉각재펌프가 비정상적으로 작동하는 상황에서도 비교적 균일한 온도의 냉각수를 노심으로 공급하는 기능을 한다.

Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 유동혼합헤더집합체는 4개의 헤더로 구성되며 각각의 헤더에는 3개의 큰 입구유로, 2 × 72개의 작은 출구유로가 설치된다. 각 헤더마다 2대의 증기발생기가 할당된다. 증기발생기 2대에서 방출된 원자로냉각재는 하나의 헤더 입구유로로 유입되고(SG1&2/H1, SG5&6/H2, SG3&4/H3, SG 7&8/H4), 헤더를 따라 원주방향으로 회전하면서 360° 전방향에 설치된 헤더 출구유로로 방출된다. 증기발생기 또는 원자로냉각재펌프의 이상으로 증기발생기에서 서로 다른 온도의 원자로냉각재가 방출되는 경우, 유동혼합헤더집합체의 각 헤더는 방출된 냉각재를 미세유동(2 × 72개)으로 세분화시켜 원주방향으로 방출시켜줌으로써, 온도가 다른 냉각재 사이의 접촉 면적을 현저히 증가시켜 온도차를 빠르게 소멸시킨다.

3. 해석모형 및 경계조건

3.1 해석모형

본 논문에서 유동은 정상상태 비압축성 난류유동으로, 점도 및 밀도 등의 유체 물성은 일정하다고 가정하였다. 난류모형으로는 2-방정식 와점성모형으로 공학적 문제에 널리 활용되고 있는 Realizable $k-\epsilon$(RKE), Renormalization Group $k-\epsilon$(RNG), Shear Stress Transport $k-\omega$(SST) 모형을 적용하였다[12,19]. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[v\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \langle u_i' u_j' \rangle \right] \tag{2}$$

$$\langle u_i \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial \langle u_i' T' \rangle}{\partial x_i} \tag{3}$$

3.2 해석 영역 및 경계조건

유동혼합헤더집합체는 작은 유로저항을 갖으면서도 원주방향으로 유량을 균일하게 배분하기 위해 서로 다른 출구직경을 갖도록 구성된다. 헤더 출구직경을 동일한 크기로 구성하는 경우 균일한 유량분배를 위해서는 헤더 내부의 국부적 압력편차를 소멸시킬 수 있는 작은 직경을 적용해야 하므로 유로저항이 증가한다. 출구직경이 동일하지 않으므로 유동혼합헤더집합체를 해석하는 경우 전체 형상을 계산영역에 포함시켜야한다. 또한 유동혼합헤더집합체 관련유로에는, 증기발생기로부터 유입되는 헤더 상부 유입유로, 헤더출구로부터 노심 입구까지의 유로 및 유로에 설치되는 많은 작은 hole로 구성된 유동분배통(flow skirt)과 하부노심지지판, 그리고 많은 핵연료로 구성되는 노심 등이 포함된다(Fig. 2). 또한 원자로냉각수는 고온으로 유동은 Reynolds 수가 큰 난류유동이다.

유동혼합헤더집합체의 열혼합 현상을 해석하기 위해서는, 많은 주변 구조물들을 함께 포함시켜 모사해야 하고 Reynolds 수가 크므로, 너무 많은 계산 자원이 소요된다. 일반적으로 Reynolds 수가 큰 난류유동에서 Reynolds 수 변화에 따른 마찰계수 변화는 매우 작다. 또한 핵연료집합체 또는 증기발생기 튜브 (본 해석에서는 단순화하여 모사함) 등 일부 제한된 형상을 제외하면, 원자로 내부 유로는 대부분은 길이 대 직경비(L/D)가 작아 마찰계수는 작고 형상계수가 전체유로저항을 지배한다. 또한 난류유동에서는 Reynolds 수를 줄이는 경우에

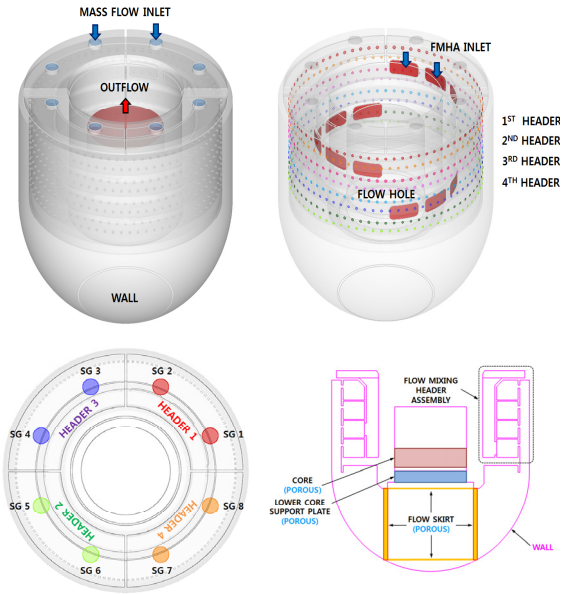


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

도 유동 및 유로저항 변화가 크지 않다[15-18].

따라서 본 논문에서는 해석영역을 SMART의 1/5 크기로 축소하고, SMART 보다 낮은 온도의 냉각수를 적용하여 소요되는 격자수를 줄였다. Reynolds 수는 SMART의 1/20 이다. 또한 형상이 매우 복잡해 적절한 격자를 사용해 실제 형상을 모사하기가 불가능한 유동분배통, 하부노심지지판 및 노심 등에 대해서는 다공(porous) 모형으로 유로저항을 단순화해 모의하였다. 다공 모형으로 유로저항을 모사하는 방법에는 해당 영역에 유로저항계수를 직접 입력하거나 다공매질로 가정하여 Darcy Low 등을 적용하여 모사하는 방법이 있다[19]. 본 논문에서는 경험상관식 및 선행 전산해석 결과[12,18] 등으로부터 확인된 유로저항계수를 입력하는 방법을 사용하였다.

한편 소요 격자수를 줄이기 위해 벽함수(SST 모형에서는 low-Re corrections 미사용)를 적용하였다. 운동량 및 난류에 대한 차분법은 2차 상류차분법, 속도 및 압력 coupling은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 또한 경계조건으로 벽에는 no-slip 조건, 입구에는 질량유량(mass flow) 및 온도 일정 조건, 출구에는 outflow(Neumann) 조건을 적용하였다. Fig. 2는 해석 형상 및 경계조건을 나타낸다.

4. 해석결과

Fig. 1과 2에 나타낸 바와 같이 유동혼합헤더집합체 및 관련 유로의 대부분은 인접하게 배치되어 상호 입출구 유동이

영향을 주고받는 3차원 유동현상에 관련되어 있어, 완전발달 유동에 근거한 경험상관식을 적용해 설계하는데 어려움이 있으므로 전산유체역학(CFD) 해석을 통해 보완할 필요가 있다. 유동혼합헤더집합체 및 관련 유로 중에 유로저항이 가장 큰 부분은 증기발생기로부터 헤더로 유입되는 유입유로와 헤더 출구유로로서, 이들 유로의 유동은 오리피스의 유동현상과 유사하다. 오리피스에 대한 상용 CFD 코드, FLUENT 12[19]를 이용한 해석결과가 경험상관식을 매우 근사적으로 예측함이 검증된 바 있어[12,16], 거의 동일한 방법을 사용하는 본 논문에서는 검증계산을 생략한다.

격자분포, 난류모형, 헤더 형상, 증기발생기 방출온도 조건을 변화시켜가며 유동혼합헤더집합체의 특성을 조사하였으며, Table 1에는 해석 case를 요약하여 나타내었다.

4.1 열혼합 성능 정의

유동혼합헤더집합체의 열혼합 성능은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta = \frac{\left(T - T_{avg}\right)_{\text{core in}}}{\left(T_h - T_c\right)_{\text{FMHA in}}} \tag{4}$$

$$\text{MP} = 1 - \left(\theta_{\max} - \theta_{\min}\right) \tag{5}$$

여기서 θ는 FMHA 입구의 온도차에 대한 노심입구의 평균온도 대비 온도차를 나타내는 무차원 노심입구 온도차이며, MP는 혼합성능변수를 나타낸다. 혼합성능변수 MP가 1인 경우 완전히 혼합된 상태를, 0인 경우 전혀 혼합되지 않은 상태를 나타낸다.

Table 1 Case summary

case	mesh (million)	high temp. coolant header	turb. model	MP	remark
A110	85.1	H1, H2	RKE	0.85	shape
B110	93.9	H1, H2	RKE	0.95	basic case
B210	123.8	H1, H2	RKE	0.95	grid
B310	143.6	H1, H2	RKE	0.94	grid
B120	93.9	H1, H2	SST	0.95	turb. model
B130	93.9	H1, H2	RNG	0.91	turb. model
B111	93.9	H1, H3	RKE	0.97	4 SG failure
B112	93.9	H1, H4	RKE	0.94	4 SG failure
B113	93.9	H2, H3	RKE	0.94	4 SG failure
B114	93.9	H2, H4	RKE	0.97	4 SG failure
B115	93.9	H3, H4	RKE	0.95	4 SG failure
B116	93.9	H1	RKE	0.94	2 SG failure
B117	93.9	H4	RKE	0.98	2 SG failure
B118	93.9	H2	RKE	0.98	2 SG failure
B119	93.9	H3	RKE	0.95	2 SG failure

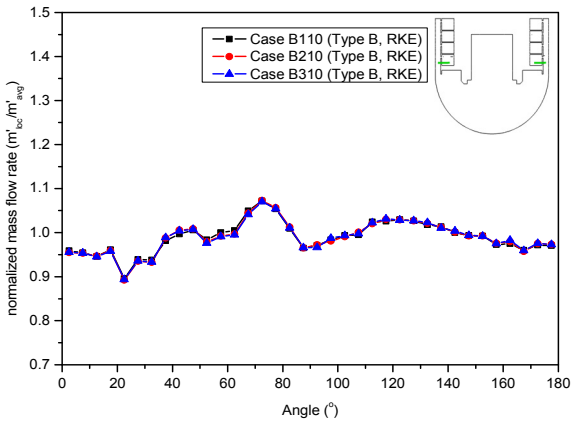


Fig. 3 The mass flow rate distribution at FMHA outlet holes

4.2 격자민감도

Fig. 3는 유량분포에 영향을 줄 수 있는 주요 유동영역 들의 격자분포를 변화시켜가며 수행된 격자민감도 분석결과 중 헤더 4의 아래쪽 반쪽 헤더 출구유로에서의 유량분포를 보여준다. 헤더 입구를 기준으로 좌우 대칭 형상이므로 유량분포는 반쪽 헤더의 유량분포이다. 그림에 나타난 바와 같이 형상이 매우 복잡하여 국부적으로 미세한 편차는 발생하나 case B110 ~ B310의 전반적인 헤더출구 유량분포는 매우 유사하다. 따라서 이후 형상 B에 대해서 93.9 백만개의 격자를 사용해 해석한다.

4.3 유동혼합헤더집합체 출구유로 방출유량 영향

형상A (case A100)와 형상B (case B100)에 대한 비교계산은 설계 또는 제작과정에 발생할 수 있는 오차, 즉 이로 인해 나타는 헤더 출구 유량분포의 차이가 유동혼합헤더집합체의 열혼합 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 포함된 것이며, case B110와 A110의 전반적인 격자분포는 유사하다. 형상A는 헤더 내부 유동을 가정하여 경험상관식 등을 이용하여 근사적으로 설계한 1차 설계안이며, 형상B는 전산해석기법을 이용하여 헤더 간 유로저항 차이와 출구 유량분포 차이를 줄인 형상이다. 형상A에서 증기발생기 토출유동이 첫 번째 헤더입구 유동에 직접 영향을 주는 현상을 완화하기 위해 형상B의 첫 번째 헤더(H1) 모서리의 곡률을 줄이고, 형상A의 헤더 출구 유량분포를 개선하기 위해 여러 번의 헤더 입구유로 및 출구유로의 수정 후 재계산 과정을 거쳐 형상B의 헤더 입구

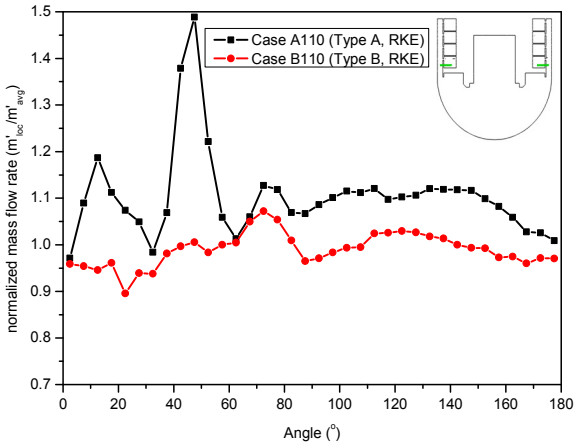


Fig. 4 Variation of mass flow rate distribution with FMHA shape

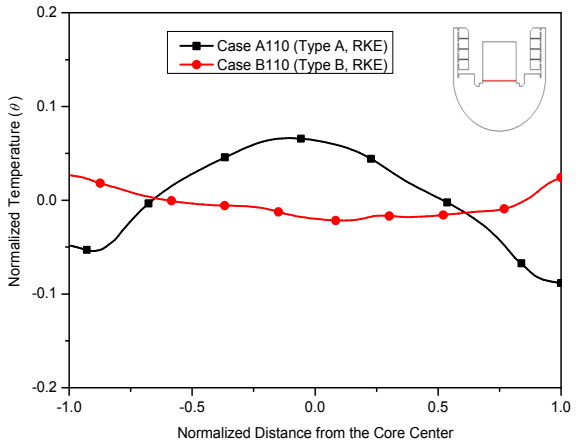
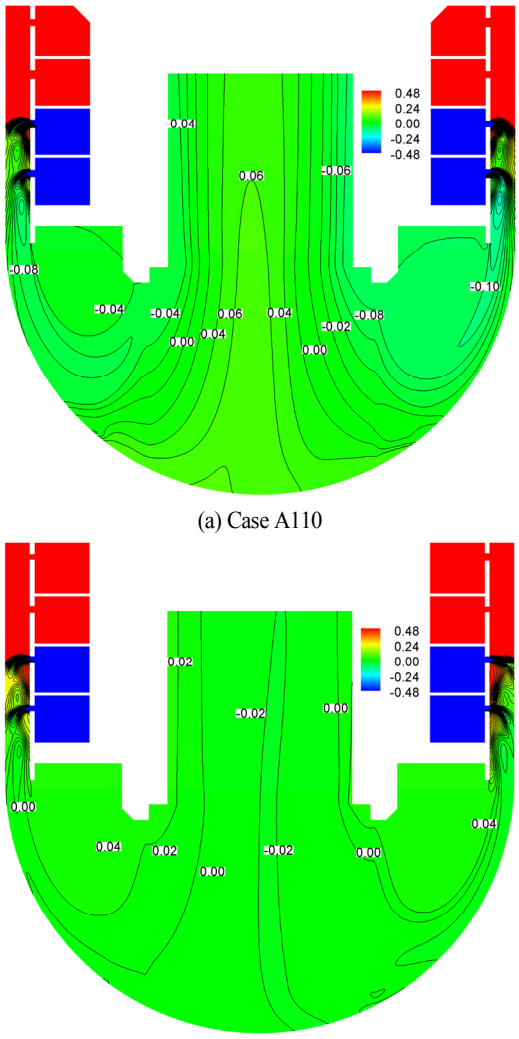


Fig. 5 Variation of temperature distribution at a center line of core inlet with FMHA shape



(a) Case A110

(b) Case B110

Fig. 6 Temperature distribution contour variation with the FMHA shape on a center plane

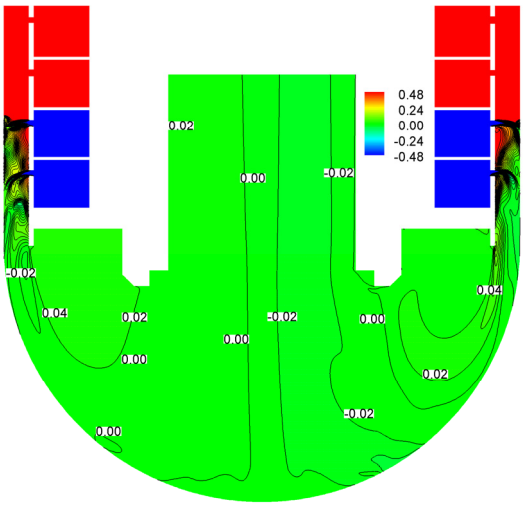
유로와 출구유로 형상을 선정한 것이다.

Fig. 4에는 case A110와 B110의 유동혼합헤더집합체 헤더 출구유로의 유량분포를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 각 헤더에는 상부와 하부 두 곳에 출구유로가 설치되므로 정확히 유량이 반씩 상하로 분배되지는 않으며, case A110는 유량분포가 최대 50% 이내의 차이, B110은 최대 10% 이내의 차이를 보인다.

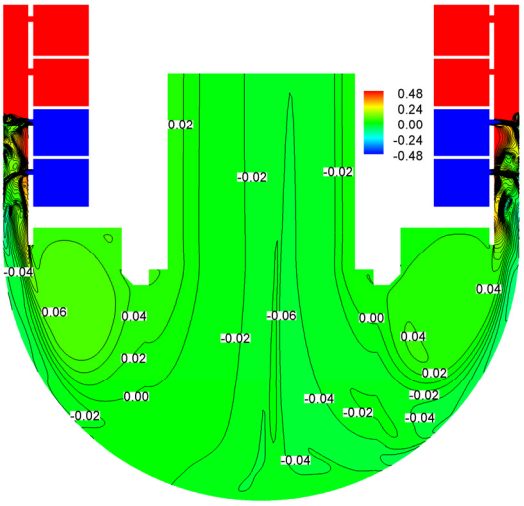
Fig. 5에는 case A110와 B110 노심입구의 온도분포를, Fig. 6에는 수직단면의 온도분포를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 노심입구 온도분포는 유동혼합헤더집합체의 유량분배 특성에 따라 다소의 영향을 받는다. 그러나 유동혼합헤더집합체가 유동을 세분화해서 재분배해 줌으로써 고온과 저온 유체 사이의 접촉면적을 크게 증대시키므로 유체가 섞이는 효과가 전반적으로 매우 우수한 것으로 나타났다. 이에 따라 유량분배가 다소 불균일한 case A110 경우에도 비교적 양호한 노심입구 온도분포를 나타내었다. SMART 유동혼합헤더집합체 혼합성능변수 MP의 성능 목표는 약 0.80으로 설정되었으며 Case A110와 B110의 MP는 각각 0.85, 0.95로 모두 성능 목표를 만족하였다.

4.4 난류 모형 영향

Fig. 6(b)의 case B110, Fig. 7의 case B120과 B130는 각각 RKE, SST, RNG 난류모형별 수직 단면의 온도분포를, Fig. 8



(a) Case B120



(b) Case B130

Fig. 7 Variation of temperature distribution at a center plane with turbulence models

에는 난류모형별 노심 입구의 온도분포를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 RNG 난류모형은 RKE 또는 SST 난류모형에 비해 잘 혼합되지 않고 하향수로로부터 노심입구까지 유사한 온도의 유동이 이어지는 것을 볼 수 있다. RNG 난류모형에서 유동이 잘 확산되지 않는 이러한 특성은 참고문서 [20,21]의 결과와 유사하며, 노심입구 온도분포는 난류모형에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 RKE, SST, RNG의 혼합성능변수 MP는 각각 0.95, 0.95, 0.91으로 모두 유동혼합헤더집합체 혼합성능변수 MP의 성능 목표 0.80을 만족하고 있어, 유동혼합헤더집합체의 열혼합 특성이 매우 양호한

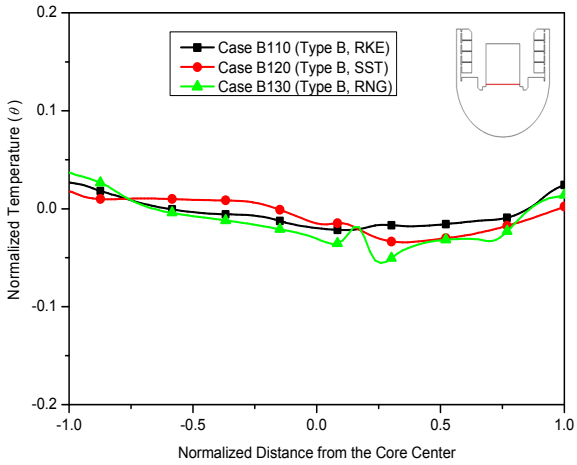


Fig. 8 Variation of temperature distribution at a center line of core inlet with turbulence models

것을 알 수 있다.

한편 동일조건에 대해 시험결과 MP는 0.94[11]를 나타내고 있어 RKE, SST 난류모형의 결과와 매우 유사하다. 그러나 시험장치의 제작 및 설치 공차, 계측기 및 운전 오차 등을 고려하면 RNG 난류모형 또한 비교적 근사적인 결과를 보이고 있어, 이러한 종류의 열혼합 해석에는 세 종류 난류모형 모두 사용 가능한 것으로 판단된다. 단, 본 해석에서는 RKE 난류모형이 가장 안정적인 수렴성을 보이고 있어 이후 해석은 RKE 난류모형을 이용해 진행한다.

4.5 증기발생기 비정상 조건에 따른 영향

원전에서는 발생 가능한 다양한 설계기준사고를 가정하여 이에 대비한 안전설비를 구비하며, 최근 일부 발생 가능성이 희박한 사고에 대해서도 사고의 중대성을 고려하여 추가설비를 구비하고 있다. 원전 사고 해석에서는 일반적으로 초기사건이외에 고장이 날수 있는 기기에 대해서는 추가적으로 단일고장이 발생한다고 가정하여 해석을 수행한다.

기존 연구에서는 다양한 해석과 실험을 통해 원자로냉각재펌프가 이상이 생기는 경우에도 증기발생기를 통과하는 유량은 거의 차이가 없음을 확인한 바 있다[14]. 또한 증기발생기에서 유량에 편차가 생겨도 유동혼합헤더집합체의 유량재분배 특성에 의해 유량 편차가 완화되고 유동분배통과 하부노심지지판의 유로저항에 의해 노심입구에서의 유량 편차는 거의 소멸된다. 따라서 본 논문에서는 원자로냉각재펌프의 이상조건은 배제하고, 증기관 또는 급수관의 이상으로 증기발생기(2대)에 이상이 발생하는 조건을 초기사건으로 가정하여(case B116 ~ 119) 해석한다. 또한 본 논문에서는 초기사건에 단일

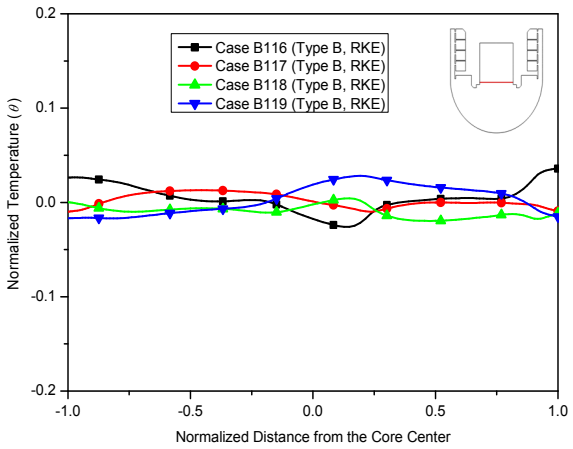


Fig. 9 Variation of temperature distribution at a center line of core inlet with two steam generator abnormal conditions

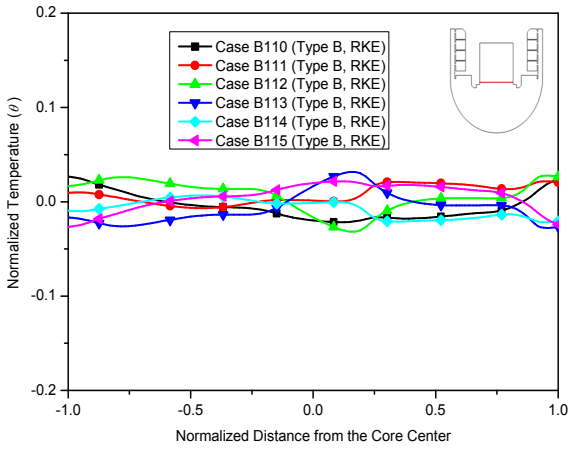


Fig. 10 Variation of temperature distribution at a center line of core inlet with four steam generator abnormal conditions

고장으로 1계열(증기발생기 2대)이 추가로 이상이 발생하는 조건에(case B110 ~ 115) 대해서도 해석한다. 참고로 Table 1에서 고온 냉각재 헤더(high temp. coolant header)로 표기된 이외의 헤더는 저온수가 유입되는 조건이다.

Fig. 9과 10에는 RKE 난류모형을 이용해 해석한 case B116 ~ 119 그리고 case B110 ~ 115의 노심 입구 온도분포를 나타내었다. 사고조건에 따라 부분적으로 노심 중심 또는 외곽의 온도분포가 약간 높은 형태를 보이는 등의 차이가 있으나, 전반적으로 온도편차는 크지 않음을 확인할 수 있다. 유동혼합헤더집합체의 혼합성능변수 MP는 case B116 ~ B119가 각각 0.94, 0.98, 0.98, 0.95, case B110 ~ B115가 각각 0.95, 0.97, 0.94, 0.94, 0.97, 0.95로 산정되었다. 유사조건에 대해 시험결과는 MP 0.92 ~ 0.97을[11] 보이고 있어 본 해석 결과와 매우 유사하다. 초기사건 하나만을 가정한 case B116 ~ B119의 혼합성능변수 최솟값이 초기사건과 단일고장을 동시에 고려한 case B110 ~ B119 보다 조금 크게 나타났다. 그러나 형상 B의 경우에 대해서는 모사한 모든 경우에 대해 MP ≧ 0.94를 보이고 있어 유동혼합헤더집합체의 설계기준 성능 목표 MP ≧ 0.80을 만족하고 있다. 따라서 유동혼합헤더집합체가 매우 우수한 혼합특성을 갖는 것이 확인되었다.

5. 결 론

SMART에 원전 최초로 개발 도입된 유동혼합헤더집합체의 혼합성능에 대해 FLUENT 코드를 이용한 전산유체해석을 수행하였다. 해석결과 유동혼합헤더집합체의 헤더 출구유로가 최대 약 50%, 10%의 방출유량 편차를 갖는 경우 혼합성능변수 MP는 각각 0.85, 0.95로서, 헤더 출구유로의 방출유량 편차가 감소하면 혼합성능이 개선된다. 그러나 두 가지 경우 모두 설계기준 혼합성능 목표를 만족하고 있어, 다소의 헤더 방출유량 편차는 허용 가능한 것으로 조사되었다. 난류모형에 따른 혼합성능은 RKE 또는 SST 난류모형이 시험결과와 매우 유사한 결과를 보이고, RNG 난류 모형이 RKE 또는 SST 난류모형보다 약 4% 정도 작은 것으로 나타났다. 형상 B에 대해 초기사건, 단일고장 등을 조합하여 다양한 사고조건을 모의하여 해석한 결과, 분석한 모든 경우에 대해 유동혼합헤더집합체가 혼합성능변수 MP ≧ 0.94를 보이고 있어 성능 목표 MP ≧ 0.80을 만족하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2012M2A8A4025974).

References

[1] 2014, Lee, G.H., Bang, Y.S., Woo, S.W. and Cheong, A.J., "Comparative study on the effect of reactor internal structure geometry modeling methods on the prediction accuracy for PWR internal flow distribution," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.70, pp.208-215.

[2] 2014, Chen, Z., Zhao, P., Zhou, G. and Chen, H., "Study of core flow distribution for small modular natural circulation lead or lead-alloy cooled fast reactors," *Annals of*

Nuclear Energy, Vol.72, pp.76-83.

[3] 2013, Kim, K., Euh, D.J., Chu, I.C., Youn, Y.J., Choi, H.S. and Kwon, T.S., "Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.265, pp.957-966.

[4] 2012, Yan, B.H., Zhang, G. and Gu, H.Y., "CFD analysis of the effect of rolling motion on the flow distribution at the core inlet," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.41, pp.17-25.

[5] 2010, Böttcher, M. and Krüßmann, R., "Primary loop study of a VVER-1000 reactor with special focus on coolant mixing," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.240, No.9, pp.2244-2253.

[6] 2007, Bieder, U., Fauchet, G., Bétin, S., Kolev, N. and Popov, D., "Simulation of mixing effects in a VVER-1000 reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, pp.1718-1728.

[7] 2005, Rohde, U., Kliem, S., Höhne, T., Karlsson, R., Hemström, B., Lillington, J., Toppila, T., Elter, J. and Bezrukov, Y., "Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235, pp.421-443.

[8] 2012, Chung, Y.J., Jun, I.S., Kim, S.H., Yang, S.H., Kim, H.R. and Lee, W.J., "Development and assessment of system analysis code, TASS/SMR for integral reactor," SMART, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.244, pp.52-60.

[9] 2014, Koo, B.S., Hwang, D.H., In, W.K. and Song, J.S., "Design features and thermal margin assessment of core protection and monitoring systems of an integral reactor, SMART," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.51, No.3, pp.390-404.

[10] 2015, Chen, H., Zhou, G., Li, S., Chen, Z. and Zhao, P., "Subchannel analysis of fuel assemblies of a lead-alloy cooled fast reactor," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.78, pp.182-189.

[11] 2012, Kim., J.W., Choi, J.S., Kim., Y.I., Chung, Y.J. and Park, G.C., "Experimental study of thermal mixing in flow mixing header assembly of SMART," *Nuclear Technology*, Vol.177, No.3, pp.336-351.

[12] 2013, Bae, Y., Kim, Y.I. and Park, C.T., "CFD analysis of flow distribution at the core inlet of SMART," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.258, pp.19-25.

[13] 2012, Yoon, J., Kim, Y.I, Chung, Y.J. and Lee, W.J., "Cross flow characteristics of the core simulator in SMART reactor flow distribution test facility," *Journal of Fluid machinery*, Vol.15, No.4, pp.05-11.

[14] 2012, Euh, D.J., Kwon, T.S., Youn, Y.J., Bae, H., Chu, I.C. and Lee. S.J., "Hydraulic characteristics of SMART reactor for a nominal condition," *9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp.50-55.

[15] 1996, Kato, M. and Hanafusa, T., "Wind tunnel simulation of atmospheric turbulent flow over a flat terrain," *Atmospheric Environment*, Vol.30, No.16, pp.2853-2858.

[16] 2014, Bae, Y. and Kim, Y.I., "Prediction of local loss coefficient for turbulent flow in axisymmetric sudden expansions with a chamfer: effect of Reynolds number," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.73, pp.33-38.

[17] 2014, Cui, R.Y., Li, Z. and Tao, W.Q., "Investigation of Re-independence of turbulent flow and pollutant dispersion in urban street canyon using numerical wind tunnel (NWT) models," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.79, pp.176-188.

[18] 1996, Idelchik, I.E., "*Handbook of hydraulic resistance*," third edition, Begell House, New York.

[19] 2009, "*ANSYS FLUENT 12.0 user's guide*," ANSYS Inc.

[20] 2013, Coughtrie, A.R., Borman, D.J. and Sleigh, P.A. "Effects of turbulence modelling on prediction of flow characteristics in a bench-scale anaerobic gas-lift digester," *Bioresource Technology*, Vol.138, pp.297-306.

[21] 2009, Yoo, G.J., Choi, H.K., Choi, K.L. and Shin, B.J., "A numerical study of the turbulent flow characteristics in the inlet transition square duct based on roof configuration," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, B, Vol.33, No.7, pp.541-551.