

초고온가스로의 RCCS 해석을 위한 축대칭 모사 방법론 평가

김성훈,^{*1} 조봉현,² 탁남일,² 김민환²

EVALUATION OF METHODOLOGY FOR AXISYMMETRIC SIMULATION OF RCCS IN VHTR

S.H. Kim,^{*1} B.H. Cho,² N.I. Tak² and M.H. Kim²

RCCS is a passive safety-related system that removes the decay heat of VHTR when normal decay heat removal systems are in failure. Understanding thermo-hydraulics of RCCS is important to design a safer VHTR. RCCS consists of 292 cooling panels, which are placed in the reactor cavity. The layout of RCCS gives an idea that, for CFD simulations, cooling panels can be assumed to be one annulus tube. This assumption can reduce significantly the computational time, especially for the unsteady simulation. To simulate RCCS in an axisymmetric manner, three models were suggested and compared. Each model has (1) the same outer radius, (2) the same cross-sectional area (3) the same pressure drop, respectively, as the RCCS cooling panels. The steady-state simulation was conducted with these three models and the DO radiation model. It is found that over 90% of the heat from the outer wall of the reactor pressure vessel is transported to the RCCS by radiative heat transfer. The simulation with the third model, which has the same pressure drop as the design, estimates the closest wall temperature profiles to a thermo-hydraulic code, GAMMA+, result.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 정상상태(Steady State), 복사열전달 (Radiative Heat Transfer), 초고온가스로(VHTR)

1. 서 론

초고온가스로(VHTR, Very-High-Temperature Reactor)의 고열을 이용한 수소 생산은 미래 에너지의 한 축으로 자리잡을 수소를 공급하는 방법으로 제안되고 있다. 초고온가스로는 기존의 헬륨냉각 고온가스로의 노심출구 온도를 수소 생산에 적합한 950℃ 부근까지 상향한 원자로이다. 헬륨냉각 고온가스로는 1960년대부터 개발되어 이미 몇 나라에서 운전된 바 있다. 한국원자력연구원에서는 2004년부터 초고온가스로의 개념설계를 시작하여 초고온가스로의 설계 및 건설에 필요한 핵심 기술을 개발하고 있다.

RCCS (Reactor Cavity Cooling System)는 초고온가스로의 사고 상황에서 노심잔열제거를 위한 최종 열침원이다. RCCS

는 중간열교환기와 정지냉각계통 등의 정상 노심 열제거 계통이 작동하지 않을 때 노심 잔열제거 수단을 제공한다. RCCS는 내부기기가 허용가능한 최고온도에 있는 상황에서도 적절한 열적 성능을 가지고 있어야 한다.

한국원자력연구원에서 개발하고 있는 초고온가스로 노형 중 블록형인 PMR(Prismatic Modular Reactor)의 RCCS는 GT-MHR[1]의 설계를 참조하고 있다. PMR은 외부 공기를 이용한 공기냉각 RCCS 계통을 채택하고 있다. PMR의 RCCS는 원자로압력용기(RPV, Reactor Pressure Vessel)의 바깥쪽에 위치하고 있는 원자로공동 안에 설치되어 있다. RCCS 냉각패널은 사각관의 형태로 292개가 원자로공동 안에 환형으로 배치되어 있다. Fig. 1은 RCCS의 개념도이다. 공기냉각 RCCS는 자연력을 이용하는 완전피동 안전계통으로, 사고 시 원자로압력용기로부터 RCCS 냉각패널에 전달된 열을 외부대기로 방출함으로써 노심의 잔열을 제거한다. 노심의 잔열은 전도, 대류 및 복사열전달에 의하여 원자로압력용기로 전달되고, 원자로압력용기에서 RCCS 냉각패널로의 열전달은 복사 및 원자로공동 내에서의 자연대류 열전달에 의하여 이루어진다. 가열된 RCCS 냉각패널 안의 공기는 자연대류가 발생하여 원자로

접수일: 2009년 6월 3일, 수정일: 2010년 3월 8일,
계재확정일: 2010년 3월 12일.

1 정희원, 한국원자력연구원, 스마트개발본부

2 한국원자력연구원, 수소생산원자기술개발부

* Corresponding author, E-mail: shkim822@kaeri.re.kr

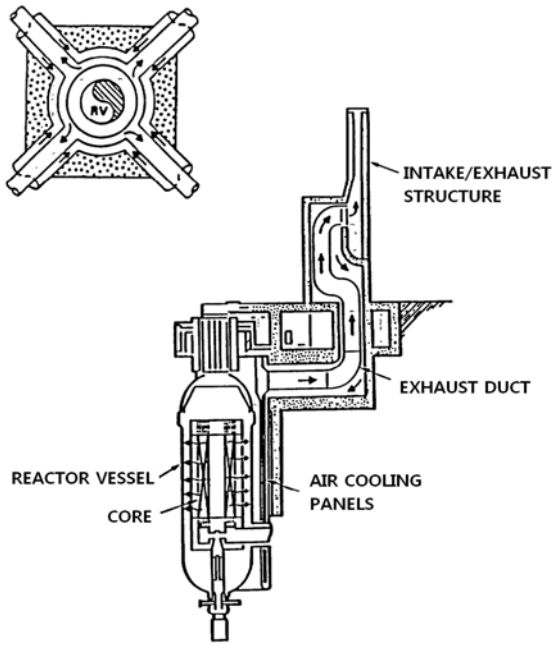


Fig. 1 Air-cooled RCCS schematic diagram

건물에 설치된 굴뚝으로 방출된다.

공기냉각 RCCS는 초고온가스로의 안전성에 중요한 역할을 하는 반면, 자연대류를 이용한 피동으로 운전된다. 펌프를 이용하는 능동계통이 아니므로 공기냉각 RCCS이 운전될 때 요구되는 성능을 수행할 수 있음을 보장하기 위해서는 실험이나 해석을 통해서 RCCS 냉각패널 내에 충분한 자연대류가 형성되고 있음을 보증할 필요가 있다.

원자력계에서는 지난 30년간에 걸쳐서 원자로가 실제 혹은 가정된 천이상황에서 열수력적인 거동을 모의하기 위한 컴퓨터코드가 개발되어 왔다. TRACE, RELAP5, SNAP등과 같은 열수력코드를 통한 전산모의는 가압경수로의 설계, 운전, 안전성에 관련한 결정을 내릴 때 도움이 되는 근거를 마련해 준다. 대부분의 경우 이러한 코드들은 복잡한 시스템을 모의하기 위해 제어체적 내의 열수력현상을 1차원으로 단순화한다. PMR의 경우 GAMMA+[2-6]라는 VHTR을 위한 열수력코드를 이용한다.

열수력코드와 달리 전산유체역학 (CFD, Computational Fluid Dynamics)은 3차원 공간에 대한 자세한 열수력적인 거동에 대한 정보를 얻을 수 있다. 하지만, 모의에 요구되는 격자 수가 열수력코드에 비해 매우 많기 때문에 현재 수준의 컴퓨터 성능으로는 열수력코드에서 얻을 수 있는 장기간의 천이 현상이나 복잡한 시스템에서의 열수력거동을 모의할 수 없는

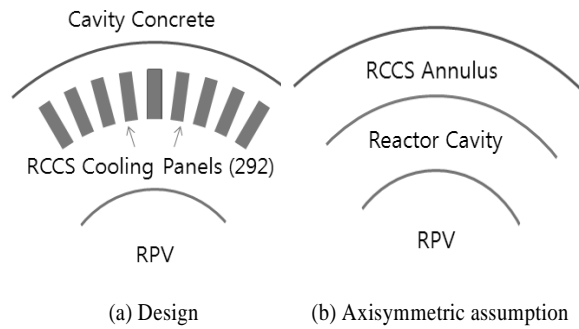


Fig. 2 Simplification of RCCS for a simulation

경우가 대부분이다.

RCCS에 대한 CFD 해석으로는 van Staden[7]이 PBMR 원자로의 RCCS의 정상상태와 과도상태해석을 위해서 STAR-CD를 이용하여 3차원 전산모의를 수행한 바 있다. 해석 대상인 PBMR은 능동형 수냉각 RCCS를 채용하고 있다. Tzanos[8]는 GT-MHR을 참조로 하는 VHTR의 피동 공기냉각 RCCS의 성능을 모의하기 위한 실험장치를 구현하기 위해서 필요한 CFD를 STAR-CD를 이용하여 수행한 바 있다.

이 논문에서는 PMR에서 채용한 피동 공기냉각 RCCS의 정상상태 성능을 예측하기 위해서 CFD를 수행하였다. 이 결과는 열수력코드인 GAMMA+의 해석 결과와 비교될 것이다. GAMMA+에서는 조사/출사(irradiation/radiosity) 방법을 사용하여 복사열전달을 해석한다. 이 방법은 계산영역 내의 유체가 복사에 관여하지 않고, 벽면은 회체, 완전산란으로 가정한다. 따라서 이 가정에서 벗어난 상황에 대해서는 모의결과의 신뢰도가 낮아진다. 이런 상황에 대해서 GAMMA+ 모의 결과에 대한 수용여부를 따지기 위해서는 CFD를 이용한 계산이 필요하다. 그러나, 해석에 적절한 복사열전달 모형으로 3차원 공간에 대해 CFD를 수행하는 경우 풀어야할 지배방정식의 개수가 늘어나 해석에 필요한 계산 시간과 계산 능력이 증가하게 된다.

환형으로 배열되어있는 RCCS의 292개 냉각패널을 한 개의 환형관으로 가정하고 축대칭 계산을 수행함으로써 계산시간을 대폭 감소시킬 수 있다. 이런 가정을 하더라도 열수력적 현상, 특히 관심 사항인 구조물의 벽면 온도를 잘 예측할 수 있는 방법이 필요하게 되었다. 이 논문에서는 축대칭 가정을 이용하여 RCCS를 모사할 때 선택할 수 있는 3가지 방법을 제시하고, 이를 토대로 예측된 각 구조물의 벽온도 결과를 GAMMA+의 결과와 비교하여 이 방법 중 가장 적절한 방법을 추천하고자 한다.

2. 계산영역 및 계산 방법

2.1 축대칭 모형

RCCS의 정상상태를 계산하기 위해 구성된 계산 영역은 원자로압력용기, 원자로공동, RCCS 냉각패널로 구성되어 있다. 설계에서 292개의 냉각패널로 구성되어있는 RCCS를 하나의 환형관 (이하, RCCS 환형관)으로 가정이 한다면 2차원 계산을 통해서도 RCCS의 상태를 전산모의할 수 있다(Fig. 2 참조). 이런 단순화 과정을 거치더라도 이 문제는 여기서 발생하는 대류와 전도의 혼합열전달을 해석적인 방법으로 분석하기 어렵다. 이보다 간단한 예를 들자면, 흑체인 관 외벽에 일정한 열속이 가해지고 관 내부에 강제대류가 있을 때 벽온도를 구하는 경우가 있다. 이처럼 단순한 경우에도 관의 벽온도에 대한 해는 적분방정식의 형태로 나오며 해는 수치적으로 구해야 한다고 알려져 있다[9].

해석을 위한 계산영역은 다음과 같다. 원자로압력용기는 반경방향으로 3.83 ~ 4.02 m의 영역이다. 원자로압력용기의 내벽(반경 = 3.83 m)에서 열속이 경계조건으로 주어졌다. 이 열속은 시스템해석 코드인 GAMMA+로 해석된 계산 결과[10, 11]이다. 원자로압력용기는 스테인레스강으로 제작되므로 이 계산영역에서는 열전도만이 해석된다. 계산 영역의 높이방향은 -3.157 ~ 16.716 m이다. 고온 가스 덕트(hot gas duct)의 중심선 높이가 0 m의 높이에 해당한다.

원자로공동은 원자로압력용기의 외벽과 RCCS의 사이에 존재하며 반경방향으로 4.02 ~ 4.722 m에 해당한다. 설계에서 원자로공동은 원자로압력용기외벽에서 원자로공동 콘크리트(Cavity Concrete)에 이르는 공간이며 292개의 RCCS 냉각패널이 설치되는 공간이다. RCCS 냉각패널을 환형관으로 가정함으로써 원자로공동은 RCCS를 기준으로 두 부분으로 나뉘게 된다. 선행 계산을 통해 RCCS 환형관 바깥쪽의 원자로공동부분은 RCCS의 거동에 끼치는 영향이 작은 것으로 밝혀져서 본 계산의 계산영역에서 제외시켰다. 대신 RCCS 환형관의 바깥쪽 벽을 단일 경계조건으로 지정하였다. 원자로공동은 1 bar의 압력인 공기로 채워져 있다.

RCCS 냉각패널은 외벽을 기준으로 2 × 10 인치의 크기를 갖으며 벽두께는 0.1875 인치인 사각판이다. RCCS 냉각패널은 원자로공동 위로 약 30 m의 추가적인 높이를 가지고 있으며 이를 굴뚝(chimney)이라고 부른다. 굴뚝은 RCCS 내의 자연대류 크기를 결정하는 부력과 압력강하에 영향을 미친다.

RCCS 냉각패널을 RCCS 환형관으로 가정함에 따라 두 형상 사이에서 발생할 수 있는 자연대류의 크기가 달라지며, 이로 인해 RCCS를 이루는 관의 표면온도가 바뀌게 된다. 이는 원자로압력용기에서 RCCS로의 복사열전달량을 변화시킨다. 그러므로, RCCS 냉각패널의 열수력적 특성을 RCCS 환형관

으로 잘 모의할 수 있도록 계산영역의 수정이 필요하다.

계산영역의 수정은 3가지 측면에서 가능하다. 첫 번째 (Model A)는 RCCS 환형관의 외벽 위치를 RCCS 냉각패널의 최외각의 크기와 같도록 설정하는 것으로 이럴 경우에는 유로 단면적이 설계에서의 RCCS 냉각패널 단면적에 비해 커진다. 두 번째 (Model B)는 설계에서의 유로 단면적과 일치하도록 RCCS 환형관의 외벽 위치를 잡는 것으로 Model A에 비해서 작은 환형관의 폭을 갖게 된다.

세 번째 모형(Model C)는 사각덕트 모양을 갖는 RCCS 냉각패널에서 발생하는 압력강하와 같은 압력강하를 갖도록 RCCS 환형관의 폭을 조절하는 방법으로 그 크기를 결정하였다. 사각 덕트에서의 압력강하에 대한 식은 Idelchik[12]의 책에서 얻었다.

$$D_h = \frac{2a_0 b_0}{a_0 + b_0} \tag{1}$$

$$\frac{\Delta P}{\left(\frac{\rho w_0^2}{2}\right)\left(\frac{\ell}{D_h}\right)} = k_{non-c} \lambda \tag{2}$$

윗 식에서 a_0 와 b_0 는 양변의 길이이며, ℓ , D_h 는 사각 덕트의 길이 및 수력직경이다. 식 (1)은 사각 덕트에서의 수력 직경에 대한 식이다. 유로 단면에서의 속도(w_0)와 밀도(ρ) 등으로 구한 Reynolds 수를 이용하여 원형관에서의 마찰계수(λ)를 구한다. 비원형관에 대한 보정계수(k_{non-c})는 사각단면의 양 길이의 비를 이용하여 구한다. 이 보정계수와 마찰계수를 식 (2)에 대입하여 사각 덕트에서의 압력강하를 구한다. 환형관에서의 압력강하는 식 (2)에 환형관의 내경과 외경의 비와 Reynolds 수로 얻어지는 보정계수와 환형관의 수력직경을 대입하여 구한다. RCCS 환형관의 내경은 RCCS 냉각패널 최내각의 크기와 같도록 고정하고 RCCS 환형관의 외경은 RCCS 냉각패널의 압력강하와 같은 압력강하가 나오도록 변경시켰

Table 1 Typical geometric dimension of each model

	Model A	Model B	Model C
Outer radius, m	4.9712	4.8250	4.7921
Inner radius, m	4.7268	4.7268	4.7268
Width, m	0.2444	0.0982	0.0653
Area, m ²	7.4485	2.9465	1.9530

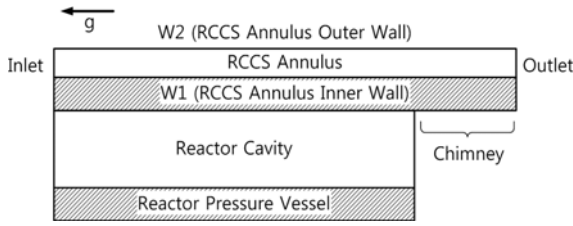


Fig. 3 Schematic diagram of computation domain

다. 환형관에서의 수력직경은 내경과 외경의 차이이다.

세 모형의 주요 치수는 Table 1에 정리되어있다. 참고로 상압, 45℃의 공기가 세 모형에서 10 kg/s로 흐른다고 하면 각각 2.04, 32.4, 125.5 Pa의 압력 강하를 갖게 된다.

환형관 내의 유량이 달라지면 RCCS 벽온도나 원자로압력 용기 벽온도의 변화가 발생할 수 있다. 벽온도 예측에 있어서 RCCS 환형관의 유량 차이를 배제하기 위해서 환형관의 자연 대류 유량을 GAMMA+에 의해 계산된 자연대류 유량과 같도록 조절하였다. RCCS 유량은 굴뚝을 포함하는 RCCS 환형관 내에서 발생하는 압력강하에 의해서 결정된다. 하지만 설계에서는 굴뚝의 형상이 정확하게 정의되어 있지 않아서 압력강하에 대한 정보를 얻을 수 없기 때문에 GAMMA+의 계산에서도 굴뚝에서의 압력강하는 가정되었다.

각 모형에 대해서 같은 RCCS 자연대류의 유량이 나오도록 하기 위해서는 계산영역에 압력강하를 추가적으로 지정하여야 한다. FLUENT [13]에서 압력강하를 부가할 수 있는 방법은 다공성매질법과 다공성점프 경계조건이 있다.

$$\Delta p = \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (3)$$

식 (3)은 다공성점프 경계조건으로 μ , α , C_2 , v , Δm 은 점성, 투과도, 압력 점프 계수, 면 수직속도, 다공성매질 두께이다. 본 연구에서는 투과도를 매우 크게 하여 식 (3)의 괄호 안의 첫 번째 항의 영향을 없애고 C_2 를 조절하는 방법으로 RCCS의 굴뚝에 다공성점프 경계조건을 이용하여 RCCS 냉각 패널의 압력강하를 근사하였다.

굴뚝 벽의 유동마찰로 인한 압력손실이 없어지도록 굴뚝의 벽은 마찰계수가 0인 미끄러짐 경계조건 (slip condition)으로 지정하였다. 그 대신 굴뚝의 한 위치에 다공성점프 경계조건을 지정하고 그 매개변수는 각 모형에서 예측되는 RCCS 유량이 GAMMA+의 결과와 같아지도록 수차례 반복계산을 통해 결정하였다.

환형관의 입출구 조건은 압력경계조건으로 지정하였다.

환형관 안으로 흐르는 유체는 공기이며 입구조건으로 45℃와 1 bar의 온도와 압력조건을 사용하였다. 온도에 따라 변화하는 공기의 물성치는 NIST의 데이터베이스에 의해서 구해진 값을 입력하여 적용하였다. 중력가속도를 고려하였으며, 부력 계산의 기준으로 사용되는 기준밀도는 외부 공기의 상태인 1 bar, 43℃의 공기 밀도 1.117 kg/m³을 사용하였다.

2.2 계산 방법

복사열전달 모형의 선택은 RCCS의 열수력 성능을 정확하게 예측하기 위해서 중요하다. 본 계산에서 사용된 코드인 FLUENT에서 사용할 수 있는 복사열전달 모형 중 DO 복사 모형[14]이 사용되었다. DO 모형에서 산란계수가 0인 경우에 대한 복사전달방정식(Radiation Transfer Equation)은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + a = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (4)$$

위 식에서 \vec{r} , \vec{s} 는 각각 위치 벡터, 방향 벡터이며 a , n , σ , I , T 는 흡수계수, 굴절율, Stefan-Boltzmann 상수, 복사 강도, 온도이다. 식 (4)를 풀기 위해서는 입체각의 각이산화 (angular discretization)을 위한 방위각 (azimuthal angle)과 극각 (polar angle)의 이산수를 지정해야 한다. 또, 격자면과 제어각 (control angle)의 불일치로 인해 발생하는 현상 즉, 격자면에서의 제어각 중 일부는 입사하는 영역이 되고 일부는 방사하게 되는 제어각 겹침현상(control angle overhang)을 해결하기 위해 지정되는 화소화(pixelation)를 위해 화소 (pixel)의 수를 지정하여야 한다. 계산의 정확도를 높이기 위해서 7x7의 각이산수를 사용하였고, 5x5의 화소화를 사용하였다. 이 경우 2차원 해석이므로 복사를 위해서는 196개의 식 (4)를 풀어야 한다. 만약 3차원 해석에서 같은 각이산수를 사용한다면 392개의 식 (4)를 풀어야 한다. 이와 함께 3차원 해석 시 필요한 격자수의 증가를 고려해 볼 때 3차원 CFD를 통한 RCCS의 모의, 특히 천이상황에서의 모의는 매우 큰 시간과 계산 능력이 필요하여 수행하기 힘든 경우가 대부분이다.

생성된 계산 모형의 개략도를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 원자로공동과 RCCS 환형관 내의 유체영역에 대한 연속 방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지 전달방정식과 식 (4)가 해석되었다. 각 식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

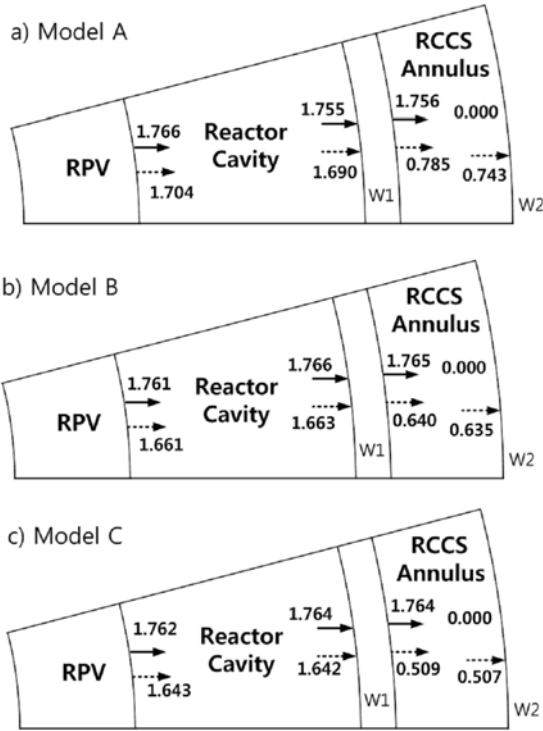


Fig. 4 Heat transfer rate on each wall [Unit: MW](solid: total, dashed: radiative heat transfer rate)

위 식에서 ρ , \vec{v} , p , $\vec{\tau}$ 는 밀도, 속도벡터, 압력, 응력텐서이다. FLUENT에서 온도는 아래와 같이 정의된 E 를 이용하여 구한다.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

이 변수에 대한 전달방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})) \quad (8)$$

위 식에서 T , k_{eff} 는 온도와 유효열전도도이다.

Fig. 3에서 빗금으로 표시된 고체영역인 원자로압력용기와 RCCS 환형관 벽 내부에서는 열전도를 해석할 수 있도록 에너지 방정식이 해석되었다. 모든 고체영역은 스테인리스강의 물성치를 갖는다. 각 고체의 열용량과 열전도도는 온도의 함수로 지정하였다. 계산 영역의 경계에 존재하는 벽 중 경계조건이 추가적으로 부가되는 원자로압력용기 벽을 제외하고 나머지는 모두 단열로 처리하였다. 스테인리스강의 방사율

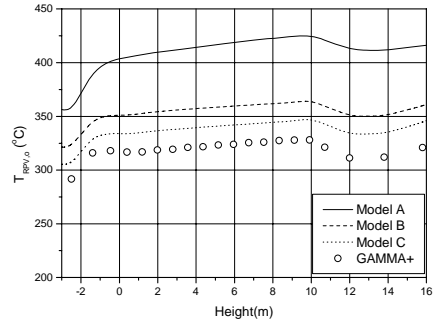


Fig. 5 RPV outer wall temperature

(emissivity)은 0.8이다. 벽은 모두 회체, 완전산란으로 가정하였다. 사용된 난류모형은 RNG k-ε 모형이며, 난류모형에 대한 벽 경계조건은 개선된 벽 처리 방법(Enhanced wall treatment)를 사용하였다.

다블러 정규격자의 형태로 격자를 형성하였으며 총 격자의 수는 44,000 개 이다. 격자 독립성 시험을 위해 격자의 수를 각 방향으로 두 배로 증가시켜 계산을 수행했으며, 열전달량의 결과가 1% 미만으로 작은 것을 확인하였다. 이하에 제시되는 값들은 44,000개의 격자를 이용하여 얻은 결과이다.

3. 결과

3.1 열전달 및 온도 비교

Fig. 4는 각 모형에서 예측된 벽에서의 열전달량을 보여주고 있다. 대류 열전달량은 총 열전달량에서 복사 열전달량을 제외한 값이다. 원자로압력용기 내벽에 가해진 열(1.77 MW)이 전도를 통해서 원자로압력용기의 외벽으로 전달된다. 원자로압력용기 외벽에서 대부분의 열은 복사를 통해서 W1으로 전달된다. Model A, B, C는 원자로압력용기 외벽에서 각각 96.5, 94.3, 93.2%의 열전달이 복사에 의한 것으로 예측되었다. 환형관 폭이 가장 작은 Model C에서 예측되는 원자로공동 내에서의 대류열전달 크기가 가장 컸다. 모든 모형에서 W1으로 전달된 열의 절반 정도는 복사열전달의 형태로 W2로 전달되며, 나머지는 W1 쪽 RCCS 내벽에서 대류의 형태로 RCCS 내부 유동에 열전달되는 것으로 나타났다. W2에서는 W1에서 전달받은 열이 모두 대류를 통해 RCCS 환형관 내의 공기로 전달되는데 이는 W2가 단열경계조건이기 때문이다. W1과 W2에서의 복사열전달은 환형관의 크기가 감소할수록 그 크기가 감소하였다. Model C의 경우 RCCS 환형관 내에서 벽 사이에 가장 작은 복사열전달이 발생하였으며, 가장 큰 대류 열전달이 발생한다.

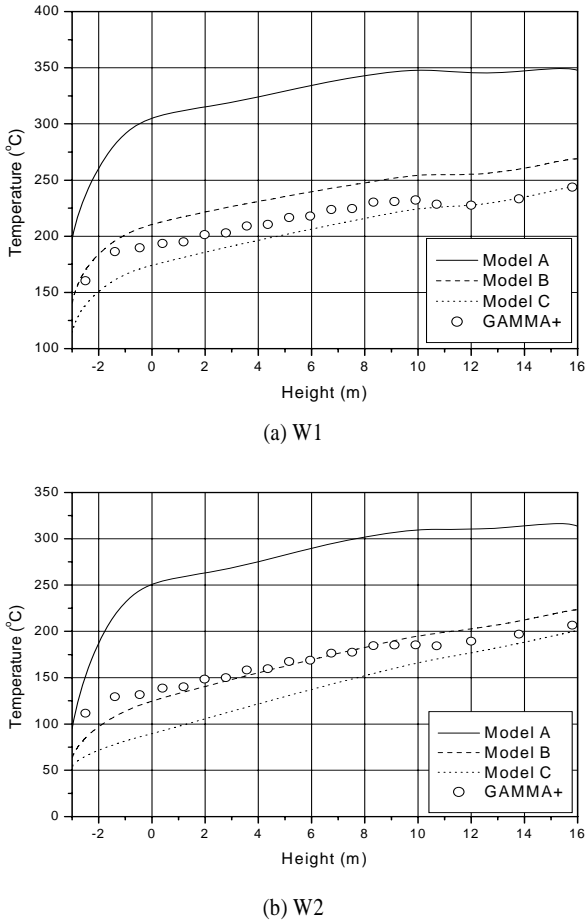


Fig. 6 RCCS annulus wall temperature

모든 모형의 RPV 외벽 온도 분포는 GAMMA+의 예측과 경향은 비슷하나 절대적인 크기는 높게 예측되었다 (Fig. 5). 특히 Model A는 다른 모형에 비해 더 높게 예측되고 있으며, 가장 비슷하게 예측하고 있는 Model C도 약 30°C 정도 높게 예측하고 있다. 높이에 따른 온도의 분포는 원자로압력용기 내 벽에 가해지는 열속의 분포가 이러한 모양이기 때문이다.

RCCS 환형관의 벽 온도에서도 RPV 외벽 온도와 비슷한 모형별 온도 예측 경향을 보인다. Model A가 다른 예측에 비해서 더 높은 RCCS 벽온도를 예측하였다. Model C로 예측된 RCCS 환형관의 벽 온도는 RPV 외벽 온도의 경우와는 다르게 GAMMA+의 예측에 비해 W1에서는 20°C 정도 낮고, W2에서는 최대 50°C 정도 낮게 예측하고 있다. Model B의 벽 온도는 두 벽에 대해서 Model C에 비해 40°C 정도 높게 예측한다. RCCS 환형관의 외벽 온도 측면에서는 Model B가 GAMMA+와 가장 비슷한 예측을 하고 있다.

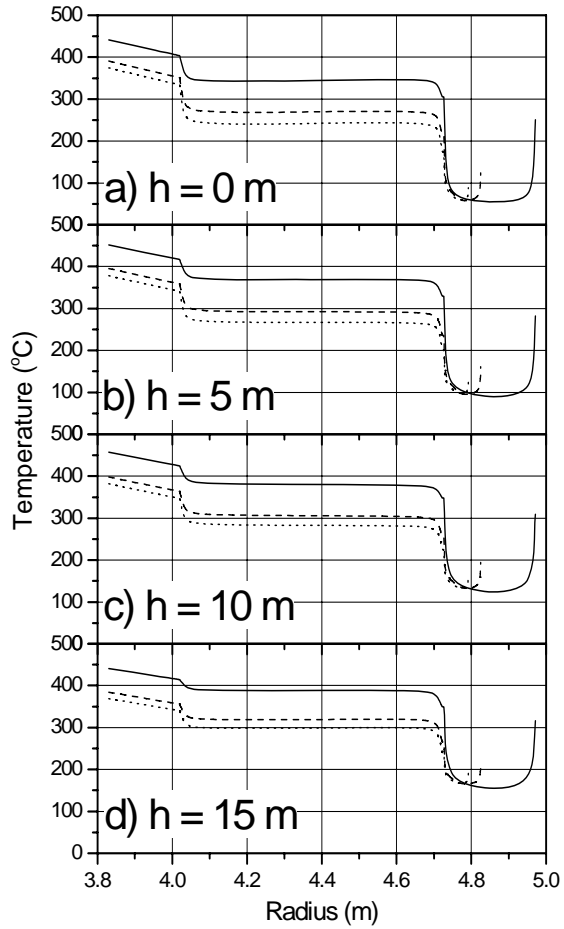


Fig. 7 Temperature distribution at selected heights (Sold: Model A, Dash: Model B, Dot: Model C)

Fig. 7에서는 0, 5, 10, 15 m의 높이별로 반경에 따른 온도 예측을 비교하고 있다. 각 모형별로 RCCS 환형관의 폭이 다르므로 그래프에서 보이는 반경의 최대값이 서로 다르다. 전체적인 온도의 경향은 모든 모형에서 비슷하게 예측하고 있다. 높이가 높아질수록 모든 영역에서 더 높은 온도를 예측하고 있다. 원자로공동의 온도는 같은 높이에서는 반경에 상관없이 거의 일정한 온도를 갖고 있는 것으로 예측되었다. 이는 자연대류에 의해서 원자로공동내의 유체가 잘 섞이고 있는 것을 간접적으로 보여준다. 각 모형에서 예측된 원자로공동내의 평균 유속은 0.162, 0.199, 0.207 m/s이다. Fig. 4에서 보이는 것처럼 대류에 의한 열전달이 클수록 더 활발한 자연대류가 발생하고 있다. 원자로압력용기와 원자로공동에서의 예측되는 온도는 Model C가 낮고 Model A가 높다. Model B는 Model C에 가깝지만 조금 높은 온도로 예측하고 있다.

RCCS 환형관 내의 유체온도는 양쪽 벽에서 높은 온도를 갖고 중심쪽에서 낮은 형태이다. W1은 RCCS 환형관 내의 유체를 가열함과 동시에 W2쪽으로 복사열전달을 하고 W2는 받은 복사열을 이용하여 근처의 RCCS 환형관 내 유체를 가열하기 때문이다. RCCS 환형관 내에서 벽 근처의 온도는 Model A가 가장 높고 중심에서의 온도는 Model A가 가장 낮다. Model B와 Model C의 온도 분포는 거의 비슷하다.

RCCS 환형관내의 평균 속도는 각각 2.056, 5.215, 7.866 m/s이다. RCCS의 유량이 같으므로 환형관의 폭이 가장 큰 Model A에서 예측된 속도가 가장 낮다. 그러므로 벽면에서 열전달이 잘되지 않아 벽면의 온도가 높게 예측되었고, RCCS 중심부의 유체온도는 낮은 것으로 예측된 것으로 보인다. 반면에 Model B와 C는 Model A에 비해서 좁은 폭을 갖고 있으므로 RCCS 환형관 내의 유속이 커서 열전달이 잘되고 있음을 알 수 있다.

3.2 결과 분석

세 모형에서 RCCS 환형관 내에서 발생하는 자연대류 유량은 굴뚝에서의 압력강하를 조절하여 같게 설정되어 있다. RCCS 환형관 내에서의 평균 유속은 유동 단면적이 가장 작은 Model C가 가장 크고, 유동 단면적이 가장 큰 Model A가 가장 작다. 강제대류의 경우에 Nusselt 수는 일반적으로 Reynolds 수의 지수에 비례하여 증가한다. 같은 유량이 흐른다면 작은 직경의 관이 더 큰 Reynolds 수를 가지게 되며 이는 큰 Nusselt 수, 즉 큰 열전달계수를 갖는다고 볼 수 있다. 비록 강제대류에 적용되는 사항이지만, 국소적으로 보아 자연대류인 RCCS 환형관에서도 같은 논리가 적용될 수 있을 것이다. 그러므로, 세 개의 모형 중에서는 수력직경과 유동 단면적이 가장 작은 Model C의 열전달계수가 크다. 동일 열전달량 하에서 RCCS 환형관에서의 상대적으로 큰 열전달계수는 Fig. 6에서 보이는 것처럼 낮은 RCCS 벽 온도를 의미한다. 원자로압력용기 외벽과 RCCS 환형관 사이의 복사열전달은 Fig. 4에서 보이는 것처럼 전체 열전달의 90% 이상을 차지한다. 낮은 RCCS 환형관의 벽온도는 원자로압력용기 외벽으로부터의 복사열전달을 증가시킨다. 원자로압력용기 외벽에서의 열제거가 잘 이루어지므로, 원자로압력용기 외벽 온도는 낮아진다. 이런 이유로 인해 Fig. 5-7에서 보이는 것처럼 Model C를 이용한 모의가 가장 낮은 벽온도를 예측한다.

사각단면을 갖는 RCCS의 292개의 냉각패널을 한 개의 환형관으로 단순화시키면서 RCCS 환형관의 자연대류 유량을 굴뚝의 한 지점에 다공질점프 경계조건을 적용하여 일치시켰기 때문에 각 모형에서 굴뚝을 포함한 RCCS 환형관의 전체적인 손실계수는 거의 같다고 볼 수 있다. 그러나, 같은 자연대류 유량이 나오도록 조절하였다고 할지라도 각 모형의

RCCS 환형관 단면적이 다르기 때문에 각 모형의 RCCS 환형관 내 유체속도는 다르며, 굴뚝을 제외한 환형관 자체의 압력 손실은 차이가 난다. Model A의 경우에는 압력강하의 대부분을 다공질점프 경계조건에서 만들어내지만 Model C는 압력강하의 대부분을 환형관 영역에서 만들어낸다. 이 때문에 Model C는 사각관과 거의 비슷한 마찰계수를 예측하게 되며, 열전달계수도 비슷하게 예측하게 된 것으로 보인다.

축대칭 가정을 이용하면 원자로공동을 RCCS의 전후로 양분시켜서 실제 대류에 참여하는 원자로공동의 크기를 감소시킨다. 이로 인해 축대칭 2차원 계산은 RCCS 바깥쪽과 RCCS 냉각패널 사이에 있는 원자로공동을 무시하게 되므로, 실제와는 원자로공동에서의 유체의 흐름이 달라지고, 각 벽의 역할이 달라질 것으로 예상된다. 대류가 전체 열전달에 차지하는 크기도 달라지고 각 벽에서의 온도분포가 다르게 예측되며, 각 벽에서의 열전달량도 다르게 예측될 것이다. 특히 3차원에서만 존재할 수 있는 RCCS 냉각패널의 옆벽이 대류나 복사 열전달에서 차지하는 비율이 축대칭으로 가정된 것의 적절성을 따지는 데 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

4. 결론

초고온가스조에 설치되는 RCCS 냉각패널의 정상상태 성능을 축대칭 가정을 통해 예측하였다. 축대칭 가정을 사용하기 위해 RCCS 냉각패널의 형상이 변경하였으며, CFD를 수행하기 위한 3가지 방법을 제시하여 열수력코드인 GAMMA+의 결과와 비교하여 보았다.

1) 원자로압력용기 내벽에 가해진 열전달의 90% 이상은 복사에 의해 RCCS로 전달되었고, 나머지는 원자로공동의 유체를 가열하는데 사용된다.

2) 설계와 같은 유동단면적이거나 압력강하를 갖도록 RCCS 환형관의 폭을 조절한 축대칭 계산모형 (Model B, C)이 GAMMA+의 결과와 비슷한 구조물 온도 분포를 예측하였다.

마찰계수와 열전달계수 사이의 상관관계를 고려할 때에는 환형관의 폭을 압력강하에 맞추어 조절하는 방법 (Model C)을 이용하면 축대칭계산을 하더라도 RCCS 환형관의 열수력적 거동을 잘 예측할 수 있을 것으로 보인다.

본 논문에서 사용한 DO 모형은 GAMMA+에서 적용된 복사모형과 다르게 유체가 복사열전달에 관여하거나 벽면이 회체가 아닌 경우에도 적용이 가능하다. 만약 원자로공동 내에 상당량의 분진이 존재하여 복사열전달에 영향을 주는 것과 같은 상황처럼 GAMMA+에서 차용한 복사모형의 제한을 벗어나는 상황에 대한 해석이 필요하게 되면 이 논문에서 제시한 방법으로 축대칭 가정을 통한 해석을 상대적으로 짧은 시간 내에 수행이 가능하다. 이 해석을 통하여 그 현상이 구조

물의 안전성이나 열수력적 거동에 끼치는 영향을 판단할 수 있다. 더 나아가 이 해석을 바탕으로 보다 자세한 해석을 위한 3차원 CFD를 수행하거나 열수력코드의 수정을 가할 수 있다.

향후에 이 방법을 통하여 RCCS의 사고 시 거동을 예측하고 열수력코드와 비교하는 연구가 필요하며, RCCS의 3차원 해석을 통해 본 연구에서 제안하는 방법을 개선하는 작업이 추가적으로 필요하다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술원의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다. (연구과제 관리코드: M20701010003-08M0101-00310)

참고문헌

- [1] 1996, General Atomics, "Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) Conceptual Design Description Report," Rev.01.
- [2] 2006, Lim, H.S. and No, H.C., "GAMMA multi-dimensional multi-component mixture analysis to predict air ingress phenomena in an HTGR," *Nuclear Science and Engineering*, Vol.152, pp.87-97.
- [3] 2007, Oh, C., No, H.C., Lim, H.S., Kim, E.S. and Kim, J.H., "Development of GAMMA Code and Evaluation for a Very High Temperature Gas-Cooled Reactor," *2007 International Topical Meeting on Safety and Technology of Nuclear Hydrogen Production, Control, and Management*, Boston, Massachusetts, June.
- [4] 2007, No, H.C., Lim, H.S., Kim, J., Oh, C., Siefken, L. and Davis, C., "Multi-component diffusion analysis and assessment of GAMMA code and improved RELAP5 code," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, pp.997-1008.
- [5] 2008, Kim, E.S., No, H.C., Kim, B.J. and Oh, C.H., "Estimation of graphite density and mechanical strength variation of VHTR during air-ingress accident," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, pp.837-847.
- [6] 2009, Jun, J.S., Lim, H.S., Jo, C.K. and Noh, J.M., "Thermal-Fluid Analysis of the PMR 200MWth Reactor System at the Steady State and Transient Conditions," *2009 Transactions of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May.
- [7] 2004, van Staden, M.P., "Analysis of Effectiveness of Cavity Cooling System," *2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, Beijing, CHINA, September 22-24.
- [8] 2005, Tzanos, C.P., "CFD Analysis for the Applicability of the Natural Convection Shutdown Heat Removal Test Facility (NSTF) for the Simulation of the VHTR RCCS," ANL-GenIV-55, Argonne National Laboratory Report.
- [9] 1972, Siegel, R. and Howell, J., *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill, Tokyo, pp.387-389.
- [10] 2008, Tak, N., Lim, H.S., Kim, M.H. and Lee, W.J., "Thermal Performance Analysis of a Cooled-Vessel Design Using GAMMA+," *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Gyeongju, Korea, May.
- [11] 2008, 탁남일, "RCCS 2-D FLUENT 해석을 위한 Geometry, 경계조건, 물성자료," *Internal communication*, 한국원자력연구원.
- [12] 1996, Idelchik, I.E., *Handbook of Hydraulic Resistance*, Begell House, New York, pp.75-121.
- [13] 2006, FLUENT, *FLUENT User's guide*, FLUENT Inc.
- [14] 1993, Chui, E.H. and Raithby, G.D., "Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol.23, pp.269-288.