

피동형 격납건물 냉각계통 내 돔 효과의 수치적 해석에 관한 연구

전지한, 박홍준, 이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

실제의 격납건물의 구조는 하부 원통형의 구조를 가지는 영역과 상부 돔 형태와 굴뚝 형태의 구조를 가지는 영역으로 나눌 수 있다. 하부 원통형의 구조만을 고려한다면, 고온의 철제 벽면과 콘크리트 벽면 사이의 gap 크기에 비해서 원통의 반지름이 상대적으로 매우 큰 값을 가지기 때문에 2차원 무한평판으로 가정하는 것이 가능하다. 그러나 돔 및 굴뚝 영역에서는 높이가 높아질수록 돔 단면적경이 감소하고 굴뚝 영역도 유동단면적이 작은 원통의 구조를 가져 2차원 무한평판의 가정에 많은 무리가 따른다. 앞에서 명시한 세 가지의 격납건물 형태에 있어서 ASPWR의 경우는 굴뚝을 포함한 영역까지도 무한평판으로 가정하는 것이 가능하나(돔에서의 열전달 단면적이 하부의 열전달 단면적에 비해 매우 작다는 가정을 한다면) 나머지 AP600과 HWRF의 격납건물에 있어서는 상부까지도 무한평판 가정을 사용하는 것에는 무리가 있다. 본 연구에서는 일반적인 유체 해석 코드인 FLUENT V4.3을 이용하여 실제 격납건물 구조에 대한 분석을 시도하여 무한평판 구조에 대한 가정이 과도한 열전달량을 예측하고 있음을 확인하였다.

1. 서 론

대부분의 신형원자로는 중대사고에 대비하고 고유의 안전성을 증대시키기 위해 가능한 한 능동기기의 사용을 지양하고 자연대류나 중력 등의 자연현상을 이용하는 피동개념을 지닌 기기들을 도입한다. 특히 밀도차에 의한 자연대류와 중력 등의 현상을 응용, 격납건물의 열을 제거하는데에 활용함으로써 격납건물의 견실성을 확보하고자 피동개념을 도입한 냉각계통을 피동형 격납건물 냉각계통 (PCCS, Passive Containment Cooling System)이라 한다. 이러한 피동형 격납건물 냉각계통은, 철제와 콘크리트의 이중 격납건물 사이에 gap을 두어 냉각을 유도하는 계통으로서 공기의 자연대류에 의한 냉각방법과, 격납건물 상부에 물탱크를 두어 중력에 의해 흘러내리는 얇은 물막효과를 첨가한 냉각방법으로 대별된다. Westinghouse사의 AP600은 후자의 방법으로 냉각하는 계통을 채택하고 있는데 상부에 있는 $56.6 m^3$ 용량의 저장탱크는 사고발생 후 약 3일 동안 공급

할 수 있는 물의 양을 보유하고 있으며 탱크가 고갈된 후에는 공기만을 사용하여 냉각하게 되고 구조적 측면에서 본다면 돔 상부로 갈수록 유로폭을 증가시켜 유동단면적이 감소되는 것을 어느 정도 보상하고 있다. 반면, Ebasco의 Heavy Water Reactor Facility(HWRF)에서 사용되는 격납건물은 공기만을 사용하여 냉각을 시도하는 방법을 선택하고 있고 철제벽면과 콘크리트벽면이 동심구 상에 존재하여 동일한 유로폭을 가지는 설계를 택하고 있다. 피동형 냉각계통을 택하고 있는 다른 격납건물 구조로는 Eabcock & Wilcox의 ASPWR이 있는데 이는 다른 격납건물과는 달리 환형 굴뚝을 사용하고 있다는 것이 특징이다. 지금까지 일련의 연구들을 통해서 수직채널에 대해서는 냉각효과를 검증하는 방법론이 구축되었으나 돔이나 굴뚝이 수직채널(즉 하부원통형 구조)에 미치는 영향에 대해서는 아직도 검증된 바가 없다. 궁극적으로 돔과 굴뚝의 효과를 포함하는 냉각 효과 검증 방법론을 개발하는 것이 본 연구팀의 목적이고 그의 일환으로 본 연구에서는 공기만의 유동을 고려하여 돔과 굴뚝이 격납건물 냉각계통에 미치는 효과를 검증하는데 그 목적이 있다.

2. 본 론

실제의 격납건물의 구조는 하부 원통형의 구조를 가지는 영역과 상부 돔 형태와 굴뚝 형태의 구조를 가지는 영역으로 나눌 수 있다. 하부 원통형의 구조만을 고려한다면, 고온의 철제 벽면과 콘크리트 벽면 사이의 gap 크기에 비해서 원통의 반지름이 상대적으로 매우 큰 값을 가지기 때문에 2차원 무한평판으로 가정하는 것이 가능하다. 그러나 돔 및 굴뚝 영역에서는 높이가 높아질수록 돔 단면직경이 감소하고 굴뚝 영역도 유동단면적이 작은 원통의 구조를 가져 2차원 무한평판의 가정에 많은 무리가 따른다. 앞에서 명시한 세 가지의 격납건물 형태에 있어서 ASPWR의 경우는 굴뚝을 포함한 영역까지도 무한평판으로 가정하는 것이 가능하나(돔에서의 열전달 단면적이 하부의 열전달 단면적에 비해 매우 작다는 가정을 한다면) 나머지 AP600과 HWRF의 격납건물에 있어서는 상부까지도 무한평판 가정을 사용하는 것에는 무리가 있다. 돔 영역에서의 비선형 유로에 기인하는 효과는 물론, 높이에 따른 유동단면적의 변화에 의한 효과도 냉각능력에 영향을 미친다. (높이에 따른 유동단면적의 변화에는 돔의 상부로 올라갈수록 유동단면적이 감소하는 것과 실제의 굴뚝단면적을 고려하는 것을 모두 포함한다.) PCCS의 돔 및 굴뚝 효과에 대한 연구의 궁극적인 목표는 여러 가지 돔과 굴뚝 구조에 대한 민감도 분석을 수행하여 가장 효율적 냉각이 가능한 구조를 제시하는 것이다. 또한 공기만을 사용한 냉각 뿐만 아니라 물막을 포함하는 분석까지 이루어져야 할 것이다. 이러한 일련의 연구의 첫 시작으로 본 연구에서는 공기유동에 대해 일반적인 돔과 굴뚝 구조를 구축하여 돔 및 굴뚝이 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 돔 영역 및 굴뚝 영역이 포함된 구조에 대한 수치적 해석을 하기 위해서는 비선형 구조에 대한 해석이 필요하다. 이를 용이하게 하기 위해서 FLUENT V4.3 CODE를 사용하여 분석하였다. 돔 영역과 굴뚝 영역의 효과는 돔 영역에서 비선형 유로로 인한 효과와 돔 영역과 굴뚝 영역에서 유동단면적의 감소로 인한 효과로 크게 두가지로 분류할 수 있다. 먼저 돔 및 굴뚝 영역을 포함하는 구조인 2차원 축대칭 구조를 선택하여 위에서 밝힌 두가지 효과를 모두 포함하는 열전달량 분석 결과를 2차원 무한평판 구조와 정성적으로 비교 평가하였다. 또한 각각의 영향을 나누어 분석하기 위해서 다음의 두 가지 구조에 대한 평가를 하였다. 비선형 유로로 인한 영향을 평가하기 위해서 2차원 무한평판 구조와

돔 및 굴뚝 영역을 포함하는 2차원 무한 비선형 구조에 대한 열전달량을 비교 분석하였다. 그리고 유동단면적 감소 효과를 보기 위해서 2차원 무한평판에 대해서 유동단면적 감소만을 고려하여 계산을 수행하였다. 2차원 무한평판 구조는 일정한 유한폭을 가지는 무한한 선형의 평판의 구조이고, 2차원 무한 비선형 구조는 돔 및 굴뚝 영역은 존재하나 유동단면적의 감소는 고려하지 않고 비선형 유로만을 고려한 비선형의 무한평판을 가지는 구조이다. 또한 유동단면적 감소를 평가하기 위해서 설정한 유동단면적 감소를 고려한 2차원 무한평판 구조는 하부 원통 영역은 유동단면적이 일정한 무한평판으로 돔 영역을 비선형은 고려하지 않고 유동단면적의 감소만을 고려한 선형 무한평판으로 가정한 구조이다. 2차원 무한평판 구조, 돔 및 굴뚝 영역을 포함한 2차원 축대칭 구조, 돔 및 굴뚝 영역을 포함한 2차원 무한 비선형 구조, 유동단면적 감소를 고려한 2차원 무한평판 구조의 형태는 각각 그림1.1과 같다.

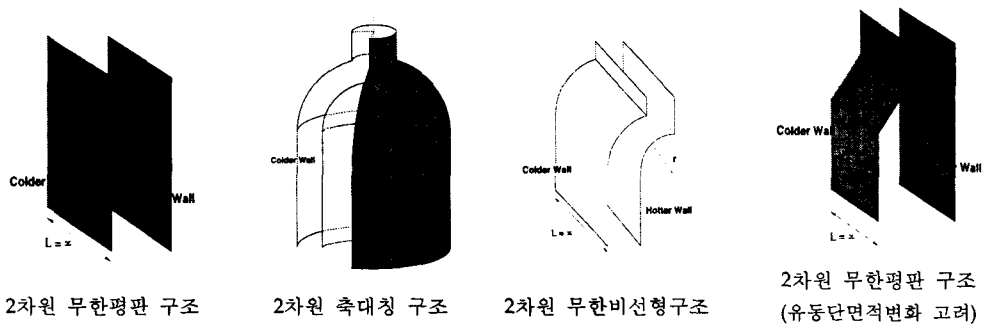


그림 1.1 해석에 사용된 각 구조

2.1 해석에 사용된 가정

해석의 편의를 위해서 본 연구에서는 몇가지 가정을 사용하였다. 정상상태(Steady State)에 관하여 분석을 시도하였고, 철제 벽면과 콘크리트 벽면은 일정 온도를 유지하며 입구유량온도는 상온을 유지한다고 가정하였다. 공기의 모든 물성치는 온도만의 함수로 가정하였다. 복사열전달은 고려하지 않았다.

2.2 FLUENT V4.3 CODE를 통한 자연대류 효과 분석

비선형 유로를 가지는 격납건물 상부(돔 영역과 굴뚝 영역)를 포함한 격납건물의 구조 효과를 해석하기 위해서는 비직각좌표계로 표현되는 3차원의 실제 물리적 영역의 모사가 요구된다. 이 때 차분식은 직각좌표계와는 달리 많은 비직각 성분을 가지며 새로운 차분 방법과 계산 알고리즘을 필요로 한다. 이를 용이하게 하기 위해서 본 연구에서는 유체해석 코드인 FLUENT V4.3을 이용하여 구조 효과에 관한 자연대류 현상을 분석하였다. 또한 FLUENT V4.3의 자연대류 효과 분석결과 타당성을 입증하기 위해서 실험자료(Miyamoto data)와 비교분석 하였다. 실험은 5m 높이의 두 평판사이에 각각 0.05m와 0.2m의 gap을 유지하는 두가지 조건 하에서 고온의 벽면은 일정열속 ($104W/m^2$)으로 열을 공급하고 저온의 벽면은 단열조건(heat flux = 0)을 가정한다. 결과는 5장에서 명시하였다. FLUENT V4.3은 일반적인 유체유동 현상, 열전달 현상, 화학작용 등을 모델링 해석/분석하기 위해 만들어진 유동해석 code로써 직각좌표계, 원통형 좌표계 뿐 아니라 곡선 좌표계에 있어서 2/3차원 구조에 대한 모사가 가능하므로 비선형 유로 등을 해석할 수 있다.

2.3 해석에 사용된 구조 및 경계조건

피동형 격납건물 냉각계통에 사용되는 격납건물은 여러 가지 형태가 있다. 특히 돔 영역에 초점을 맞추어 생각했을 때, 서론에서 명시한 바와 같이 AP600의 경우와 같이 돔 상부로 갈수록 유로폭을 증가시키는 형태와 HWRF와 같이 동일한 유로폭을 가지는 경우로 구분할 수 있다. 정성적으로 볼 때 모든 조건이 동일하다면, AP600의 경우와 같이 돔 상부로 갈수록 유로폭을 증가시키는 형태의 격납건물이 동일한 유로폭을 가지는 HWRF와 같은 격납건물보다 더 나은 열전달 능력을 가질 것으로 예상된다. 그 이유는 동일한 유로폭을 가지고 돔을 구성할 경우 돔 상부로 갈수록 그 유동단면적이 상당히 감소하므로 입구로 유입되는 공기의 유량도 상대적으로 감소하여 냉각능력이 저하될 것으로 예측되기 때문이다. 그러므로 돔 구조에 대한 연구는 여러 가지 격납건물에 대한 민감도 분석이 수행되어야 한다. 돔 연구에 대한 첫시도로 본 연구에서는 격납건물의 돔 영역과 굴뚝 영역의 효과를 정성적으로 분석함에 있어 좀 더 보수적인 일반화된 모델을 설정하기 위해서 HWRF 격납건물을 선택하여 철제 벽면과 콘크리트 구조물은 동심구 상에 존재한다는 구조를 사용하였다. 다시 말하면, 두 구조물은 동일한 중심을 갖고 있고 원통형 구조물의 채널 폭과 동일한 폭을 가지는 돔 영역이 존재하고, 돔의 형태는 반구형의 돔이다. 굴뚝 영역의 반지름은 원통채널의 두께와 동일하게 설정하였다. 해석에 적용하고자 하는 구조는 다음 그림과 같다.

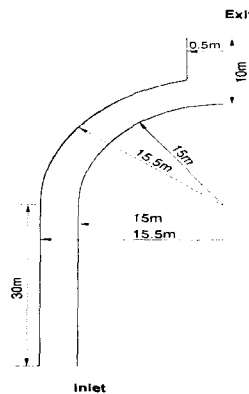


그림 2.1 해석에 사용된 냉각영역

자연대류의 경우 입구와 출구에서의 속도를 알 수 없으므로 입구와 출구에서의 경계조건은 상대적인 압력값으로 주어진다. 실제 해석에 있어서 절대적인 압력값보다는 계통의 압력에 상대적인 압력차가 중요하므로 경계조건도 operating pressure의 상대적인 값을 부여한다. 입구와 출구의 압력이 대기압에서 크게 벗어나지 않으므로 본 연구에서는 계통의 압력을 대기압으로 한다. 대기압의 상대적인 총 압력은 다음과 같이 정의된다.

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2} \rho |v|^2 \quad (4.1)$$

여기서, p_0 는 total pressure이고 p_s 는 static pressure이다. 열전달에 관한 경계조건을 부여함에 있어서 일정온도 조건을 사용하였다. 경계조건은 다음과 같다.

입구 : $p_0 = 0, \quad T = T_c(293K)$

출구 : $p_s = 0$

철계 벽면 : $u = v = 0, \quad T = T_h(383K)$

콘크리트 벽면 : $u = v = 0, \quad T = T_c(293K)$

3. 결 과

그림 3.1의 결과는 균일한 열속조건($104W/m^2$)에서 철계 벽면의 온도와 입구로 유입되는 온도의 차이에 대해 FLUENT V4.3 CODE를 사용하여 해석한 결과와 Miyamoto의 실험값을 비교한 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 FLUENT V4.3 CODE를 사용하여 해석한 결과가 Miyamoto의 실험값에 비해 다소 낮게 나타난다. 즉 code에 의한 해석이 실험값보다 열전달계수를 다소 높게 계산한다. 해석에서 난류계산에 사용된 모델에서 그 원인을 찾을 수 있다. 본 해석에서 난류계산을 위해 사용된 모델은 표준(Standard) k- ϵ 모델이다. 표준 k- ϵ 모델은 무한 Re 수 가정에 근거하여 유도되었으며 이 가정이 맞지 않는 벽 근처에서는 log 함수 형태의 벽함수를 사용한다. 일반적으로 이러한 표준 k- ϵ 모델을 사용한 자연대류 경우에 열전달계수는 다소 높게 계산된다고 알려져있다. 그러나 열전달계수는 다소 높게 계산되고는 있지만 경향은 거의 일치하는 것을 볼 수 있으므로 각각의 구조에 대해 상대적인 열전달량을 분석하는 것은 가능하다고 평가된다. 그림 3.2에서 볼 수 있는 것과 같이 돔 및 굴뚝 영역을 포함한 2차원 축대칭 구조로 해석한 열전달계수는 2차원 무한평판 가정을 사용한 열전달계수의 약 40% 정도의 값을 가지며 2차원 무한 비선형 유로인 경우에는 열전달계수가 2차원 무한평판에 비해 열전달계수가 약 70%내외의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 즉 열전달계수의 감소 중 비선형 유로로 인한 감소 효과가 약 50%, 유동단면적의 감소로 인한 감소 효과가 약 50% 정도임을 알 수 있다. 그림 3.3에서 볼 수 있듯이 2차원 축대칭 구조의 입구속도 또한 2차원 무한 평판의 3%내외의 값을 보인다.

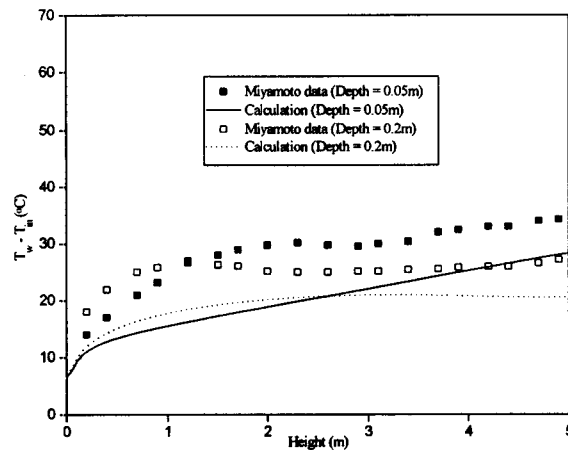


그림 3.1 Miyamoto 실험과 FLUENT V4.3 CODE 비교

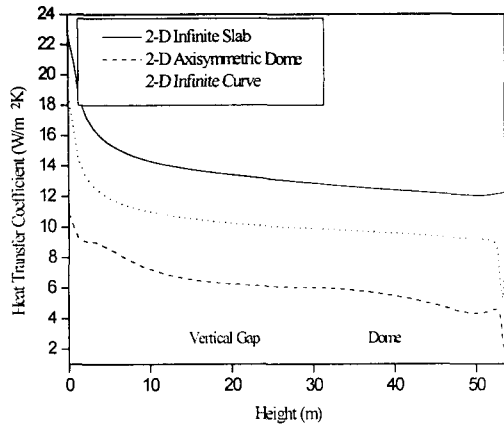


그림 3.2 각 구조의 열전달 계수

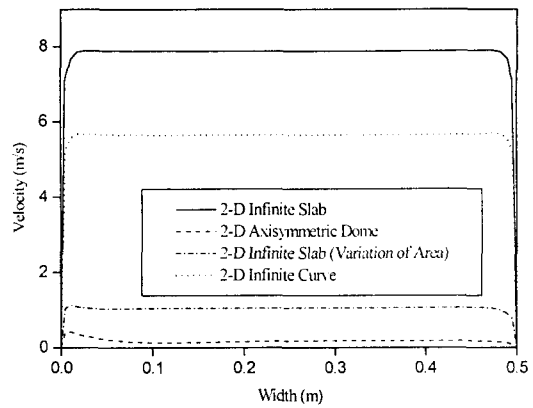


그림 3.3 각 구조의 입구속도

4. 결론 및 제안사항

피동형 격납건물 냉각계통의 냉각능력을 해석하는데 있어서 원통의 반지름에 비해 gap의 두께가 매우 작은 값을 갖는 격납건물의 하부 원통부에서는 2차원 무한평판 가정이 어느 정도 타당한 결과를 얻을 수 있으나 격납건물 상부인 돔 및 굴뚝 영역을 고려하면 상부로 올라갈수록 중심축으로부터 격납건물로의 돔 단면직경이 감소하기 때문에 2차원 무한평판으로 가정하는 것에 무리가 생길 것으로 보인다. 그러므로 3차원 또는 2차원 축대칭 구조를 사용한 돔 영역에 대한 해석은 필수적이다. 본 연구에서는 2차원 축대칭 구조를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 있어서 앞에서 제시한 여러 가지 돔 형태에 대한 실제적인 분석이 시도되어야 하지만 본 연구에서는 가장 보수적인 결과를 제시할 것으로 예상되는 동심구 형태의 돔 구조에 대한 해석을 수행하였다. 실제의 돔 및 굴뚝 영역이 포함된 2차원 축대칭 구조를 고려한 경우의 열전달계수는 2차원 무한평판 가정을 사용한 경우보다 다소 낮게 계산되었다. 그 원인은 돔 상부로 올라갈수록 유동단면적의 감소에 의한 영향과 비선형 유로에 의한 영향 그리고 하부 원통부에 비해 굴뚝에서의 작은 유동단면적으로 인한 영향에 의해 상당한 입구속도의 감소효과와 이로 인한 열전달량의 감소효과가 있었다. ASPWR의 격납건물을 무한평판 구조로 가정하는 것에 별 무리가 없다고 할 때, 모든 조건이 동일하다면 HWRF 형태의 격납건물보다 ASPWR 형태의 격납건물의 냉각능력이 뛰어나다고 할 수 있다. 이후의 피동형 격납건물 냉각계통에 대한 모델링에 있어서 돔 및 굴뚝으로 인한 입구속도와 열전달계수의 감소 효과를 고려해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 돔의 구조의 보수적인 일반화를 위해서 철제 벽면과 콘크리트 벽면이 동일한 동심구 상에 위치한다는 가정을 사용하였다. 유동단면적의 감소에 의한 이러한 영향을 보상하기 위해서는, 격납건물의 높이에 따라 유로의 폭(단면적)을 증가시키는 방법 등을 고려한 AP600과 같은 여러 가지 돔 및 굴뚝의 형태에 대한 해석이 고려되어야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 공기만을 사용한 돔 영역의 분석이 시도되었으나, 더 나아가 물막을 포함한 분석도 함께 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 한국전력공사의 95년도 전력기초연구로서 한국전력공사의 지원으로 수행되었음