2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# OECD-SETH PANDA Tests 예비해석을 통한 MARS 다차원 해석능력 평가

## Assessment of Multi-Dimensional Analysis Capacity of the MARS using the OECD-SETH PANDA Tests

배성원, 정재준, 정법동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요 약

OECD/NEA-SETH에서 추진하고 있는 PANDA Test의 목적은 격납건물내의 다차원 비응축 가스분포와 혼합 현상을 모사하는 코드를 검증하기 위한 것이다. 즉 공기, 또는 헬륨과 공기가 채워진 공간에 수평방향으로 증기를 분출하고 이후 공간내의 공기, 또는 헬륨의 분포와 온도를 측정함으로써 다차원적 해석능력을 가진 코드를 실험적으로 검증하는 것이다. 다차원 해석기능을 가진 MARS는 격납건물 해석 전용 코드가 아니지만 향후 이 실험결과를 이용하여 다차원 해석능력을 검토하기 위해 예비 계산을 수행하여 보았다. 25개의 PANDA 실험중 예비 계산용으로 선정된 실험은 Near Wall Plume Test인 PANDA Test No. 9, 16, 17이다. 이 실험은 과열 증기의 주입 속도를 증가시켜 각 경우의 증기 분출류 형상과 공간내 온도변화를 비교하는 실험이다. 증기가 주입되는 공간을 모사하기 위하여 MARS의 Multid Component를 이용하였으며, 계산의 편의를 위하여 직경 4m, 높이 8m인 원통형 베셀을 사각 챔버로 단순화하여 직교 좌표계로 묘사하였다. Grid의 수는 9x11x23이고 증기분출류 부근에서 작은 크기의 Grid를 가지도록 모델링하였다. 해석결과 1차원 해석으로는 구현 할 수 없는 속도장과 온도의 공간적 분포차이가 입구증기의 분출속도에 따라 대조되어 잘 나타나고 있음을 확인하였다.

## Abstract

The objectives of OECD/NEA-PANDA Tests are to validate and assess computer codes that analyze the non-condensible gas concentrations and mixing phenomena in a reactor containment building. Especially, the main issue is multi-dimensional analysis capability which is involed in the mixing of non-condensible gases, i.e. hydrogen. The

main tests consist of a superheated steam flow injection into a large vessel initially filled with air or air/helium mixtures. Then the temperature and concentration of non-condensible gases are measured. A pre-calculation has been performed with the MARS about PANDA Tests even though MARS is not a containment analysis code. Three cases among 25 PANDA Tests are selected and are modeled to simulate the jet plumes and air mixing in a large vessel. The dimensions of large vessel are 4 m diameter and 8 m height. For the conclusion of calculation, the cylindrical vessel which dimensions are 4 m diameter and 8 m height was simplified as rectangular geometry. It is revealed that the MARS code has the capability to distinguish the multi-dimensional distribution of the velocity and the temperature fields.

## 1. 서론

현재 세계적으로 다차원 기능을 가진 열수력 안전해석 코드의 필요성이 크게 대두되고 있으며 이러한 필요성을 충족시키기 위해 각종 노력이 이루어지고 있다. 특히 1차원 모델링으로 모의 할 수 없었던 다차원 현상을 해석하여 현재 가동중인 원전의 안전성을 신장하고 새로 설계되는 원전의 보수성을 적절히 경감하는 것이 다차원 해석의 궁극적 필요성이다. 이러한 목표를 위해 수행하는 다양한 노력 가운데 OECD/NEA-SETH가 주관하는 OECD/NEA PANDA Tests Program은 원자로 격납용기내의 비응축성 가스의 확산과 층류현상, 그리고 혼합현상을 다차원적으로 해석하는 코드를 실험적으로 검증하기 위한 활동이다[1].

OECD/NEA-PANDA Tests Program은 제5차 회의를 2003년 6월에 개최하였고 세부적인 25개의 실험 항목 선정을 마친 상태이며 연내에 실험에 돌입할 계획이다[2,3]. 이 Program은 기존의 다차원 해석기능을 가진 코드들에 대한 검증을 주요 목표로 삼고 있으며, 과열 증기를 공기 또는 공기/헬륨으로 채워진 거대 용기에 분출시켜 혼합현상과 분출류의 거동, 온도와 속도장등을 측정하는 것이 주요 내용이다. 실험 장치는 크게 4개의 원통형 탱크로 이루어져 있고 1개의 히터에서 증기를 공급하는 역할을 수행한다. 그림 1에 PANDA Tests Facility를 도시하였다. 아래쪽에 위치한 2개의 큰 탱크는 각각 120 $m^3$의 체적으로 제작되었고, 상부의 탱크는 각각 90$m^3$의 체적을 가지도록 제작하였다. 특히 상부의 탱크는 DW1, DW2라 하여 OECD/NEA-PANDA Tests가 주로 행해지는 실험 공간이다. 실험에 사용되는 증기는 RPV 히터에서 만들어져 DW2 내부에 위치한 노즐로 보내지며 증기제작용 소모 전력은 1.5 MW로 제작되었다.

전체적인 실험은 Jet Impinging Test(8개 항목), Near-Wall Plume Test(9개 항목), Free Plume Test(7개 항목) 등으로 구성된다. 연내에 우선적으로 수행될 실험은 Near-Wall Plume Test이며 이 실험의 증기의 주요변수는 분출속도와 분출높이 그리고 탱크에서 외부로

배출되는 위치 등이다. 표 1에 Near-Wall Plume Test를 간략히 정리하여 소개하였다.

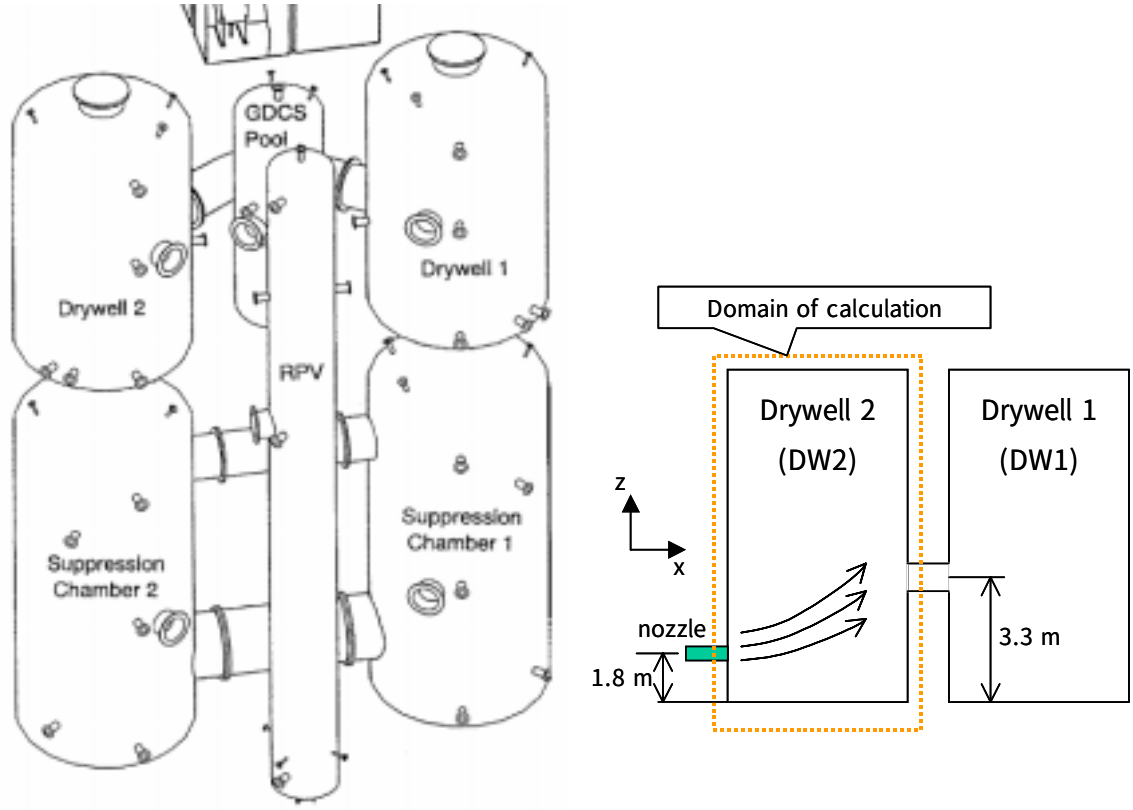



그림 1. OECD-PANDA TEST FACILITY의 3차원 조감도와 개략도

표 1. Near-Wall Plume Test의 변수 구성과 특징

| Test No. | Injection Elevation (m) | Injection Velocity (m/s) | Air concentration (%) | Vent location | Notes |
|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 1.8 | 1 | 100 | DW1 top | Reference |
| 10 | 1.8 | 1 | 100 | DW2 bottom | Effect of vent location |
| 11 | 1.8 | 1 | 50 | DW1 top | Effect of composition |
| 12 | 4.0 | 1 | 100 | DW2 top | Effect of elevation |
| 13 | 4.0 | 1 | 100 | DW2 bottom | Effect of vent location |
| 14 | 6.0 | 1 | 100 | DW1 top | Steam concentration |
| 15 | 6.0 | 1 | 100 | DW1 bottom | Effect of vent location |
| 16 | 1.8 | 3 | 100 | DW2 top | Seek transition of plume |
| 17 | 1.8 | 5 | 100 | DW2 top | Seek transition of plume |

OECD/NEA 에서는 Near-Wall Plume Test에 대한 예비계산(Scoping Calculation)을 자체적으로 수행하여 온도와 농도 측정점, 속도장 측정 지점등의 선정을 이미 완료하였다. 이때 상용코드로는 CFX-4와 FLUENT 등이 일부 계산에 활용되었고 격납건물 해석용 코드인 GOTHIC이 전체적인 계산에 이용되었다. 특히, CFX-4를 통해 Near-Wall Plume Test의 9, 16, 17번 실험을 계산하여 DW1 탱크내 측방평면에서의 온도분포를 제시하였다.

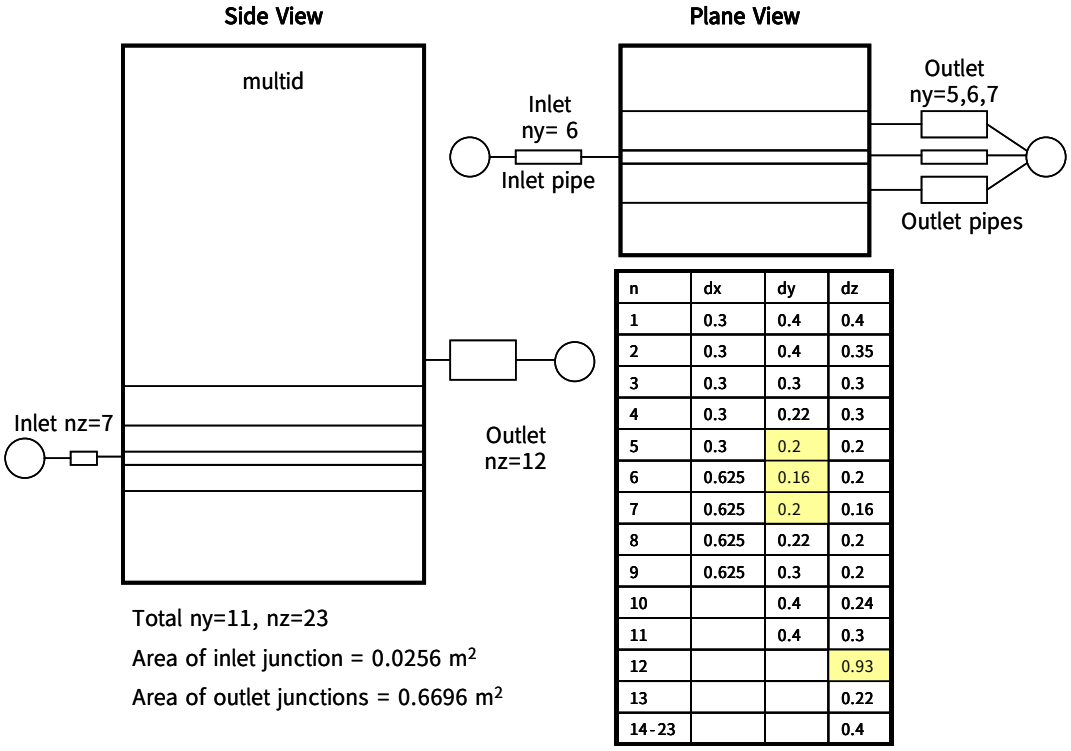
KAERI에서 개발중인 최적 계통 열수력 안전해석 코드인 MARS[4]는 다차원 해석기능을 보완하기 위하여 운동량 지배 방정식을 3차원으로 확장하였고, 다차원 형상의 입력을 위해 " multid" component를 추가하였다[5]. 운동량 방정식의 3차원 확장은 크게 대류항의 확장과 난류점성항의 추가로 이루어 졌으며 난류 점성을 계산하기 위하여 Prandtl's Mixing Legth Model을 사용하였다[6]. 그간 몇가지 간단한 개념적 문제를 다루어 다차원 해석 기능을 검증하였고, 실제적인 문제에도 활용의 단계를 높이기 위해 다양한 시도를 하고 있다. 이에, OECD/NEA가 주관하는 PANDA Tests의 예비계산을 Benchmarking하여 MARS의 다차원 해석 기능을 검증하고자 한다.

## 2. Modeling of Three PANDA Tests

예비 계산용으로 선정된 9, 16, 17번 실험은 DW2 탱크 내부를 380 K의 상압공기로 채우고 아래에서 1.8 m 높이에 위치한 0.16 m 직경의 노즐을 통해 411 K의 과열증기를 분출하는 실험이다. 실험의 주요 인자는 증기의 분출속도로서 각 분출속도에 따라 탱크 상부의 온도 분포와 DW1의 온도 성층화를 관찰 측정하는 것이 주요 목표이다. 부가적으로는 제트의 중심이 탱크내에 뻗어가는 길이와 이후 부력에 의해 형성되는 증기의 흐름이 탱크 상부 온도의 분포와 상승 경향에 영향을 끼치므로 분사노즐 주변의 속도장도 PIV(Particle Image Velocimetry)로 측정한다. DW2와 DW1을 연결하는 직경 0.8 m 의 파이프는 중심이 아래로부터 3.315 m에 위치한다. 외부와 연결된 배출구는 DW1에 연결되어 있다. 따라서, 분사된 증기는 열결 파이프를 통과하여 DW1의 상부에 위치한 배출구로 빠져나간다. 전체 Near-Wall Plume Tests는 이 배출구의 위치도 주요 인자에 포함되지만 예비계산용으로 선정된 3개의 실험은 모두 DW1 상부에 배출구가 위치한다.

분출속도에 따른 증기제트의 분사형태 비교라는 실험의 주안점을 잘 모사하기 위하여 MARS " multid" component를 이용하여 노즐이 있는 DW2를 예비 해석 대상으로 삼았다. 격자의 크기도 변화를 주어 노즐 주변은 조밀하게 격자를 구성하였고 탱크 상부에는 큰 격자를 가지도록 하였다. 또한 계산 도메인은 실제로는 직경 4 m, 높이 8 m의 베셀형 탱크이지만 계산의 편의를 위하여 직교 좌표계로 격자를 구성하였다. 격자 개수는 x, y, z 좌표로 9, 11, 23개이며 총 2277개의 계산 node로 구성된다. 분사노즐의 직경에 맞추어 y-방향의 격자를 구성한 상태에서 출구연결 파이프를 모델링하기 위해 출구로 쓰이는 정션은 3개로 구성하였다. 이러한 MARS의 격자구성과 각방향 격자의 크기를 그림 2에 정리하였다.

다차원적인 유동의 확산과 온도장의 변화를 보기 위해 사용자 입력으로 요구되는 난류혼합 특성길이를 0.08로 설정하였다. 이것은 증기 분출류 주변의 격자 길이가 0.16인 점을 감안하여 격자 길이의 반으로 설정된 것이다.




| n | dx | dy | dz |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| 2 | 0.3 | 0.4 | 0.35 |
| 3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 4 | 0.3 | 0.22 | 0.3 |
| 5 | 0.3 | 0.2 | 0.2 |
| 6 | 0.625 | 0.16 | 0.2 |
| 7 | 0.625 | 0.2 | 0.16 |
| 8 | 0.625 | 0.22 | 0.2 |
| 9 | 0.625 | 0.3 | 0.2 |
| 10 | | 0.4 | 0.24 |
| 11 | | 0.4 | 0.3 |
| 12 | | | 0.93 |
| 13 | | | 0.22 |
| 14-23 | | | 0.4 |

그림 2. MARS nodalization과 각방향 격자크기

이렇게 모델링된 탱크에 1, 3, 5 m/s의 과열 증기를 입구 정션에 계산초기(t=0.0)부터 인가하였다. 세 경우 모두 계산시간을 150 초로 제한하였다.

## 3. Results

본 예비계산의 주요 인자는 증기의 주입속도에 따른 제트류의 거동과 탱크 상부의 온도상승 추이이다. 그림 3은 5 m/s 증기 분출의 경우 60 초 경과 시점에서 측방 평면에서 본 속도장과 온도장이다. 계산 시간은 계산 속도가 가장 빠른 1 m/s 분출의 경우에 PENTIUM IV급의 256 Mbyte RAM이 장착된 PC로 3200초 가량이 소요된다. 속도장의 경우, 수직한 노드간의 거리가 0.5 m/s로 스케일링 되어 있고 온도장의 경우에는 380 K에서 390 K간의 온도가 청색에서 적색까지의 색으로 표시되었다. 수평, 수직 노드간의 거리는 실측으로 도시되지 않았으므로 실제 해석 공간상의 분포는 각 노드의 크기를 고려하여 이해되어야 한다. 그림 3에서, 증기 주입구 근처의 속도장 발달이 부력을 포함하여 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다. 제 5번

노드까지의 거리인 1.5 m 이내에서 강한 부력으로 인해 제트의 흐름이 상층부로 향하고 탱크내를 관통하는 흐름은 나타나지 않는다. 온도장의 경우에는 제트가 상부 벽면에 도달한 뒤 좌, 우측으로 갈라지는 현상이 잘 나타나고 있다.

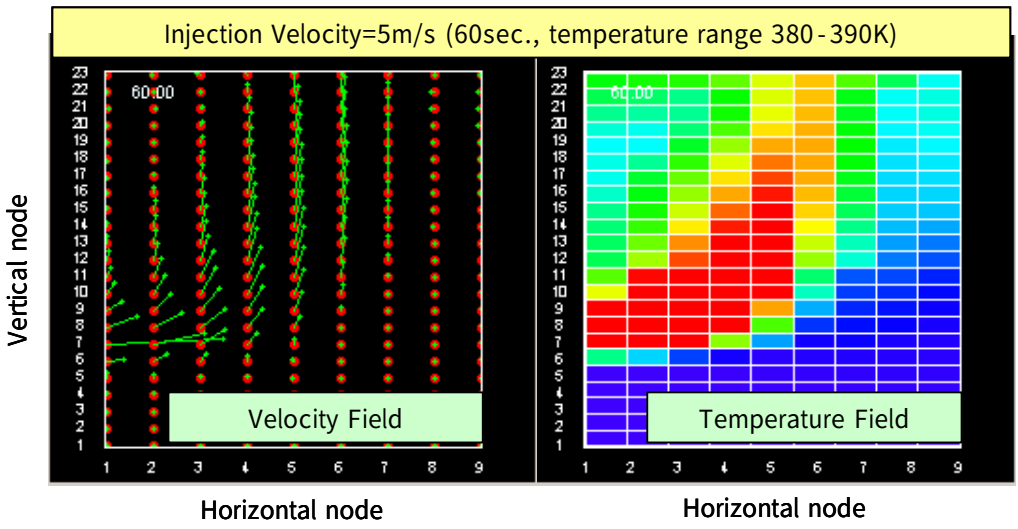



그림 3. 5 m/s 증기분출후 60 초 경과시의 DW2 내부 속도장과 온도장

그림 4와 5는 각각 3 m/s와 1 m/s로 증기를 분출 시켰을 경우의 속도장과 온도장이다. 증기 분출속도가 3 m/s인 경우에, 제트류가 분출 입구로부터 1 m 거리 이내에서 사라지고 부력에 의해 상층부로 향하는 수직한 흐름으로 바뀌고 있다.

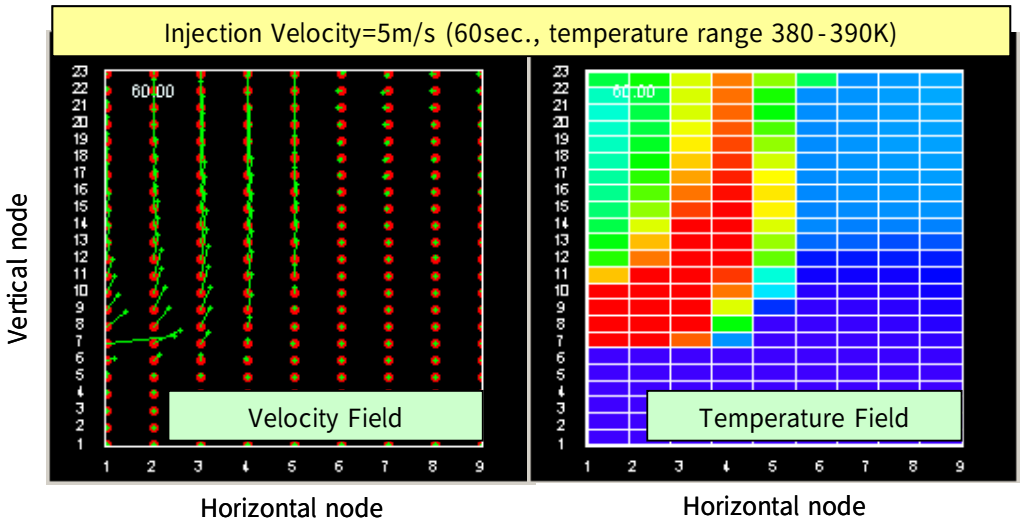



그림 4. 3 m/s 증기분출후 60 초 경과시의 DW2 내부 속도장과 온도장

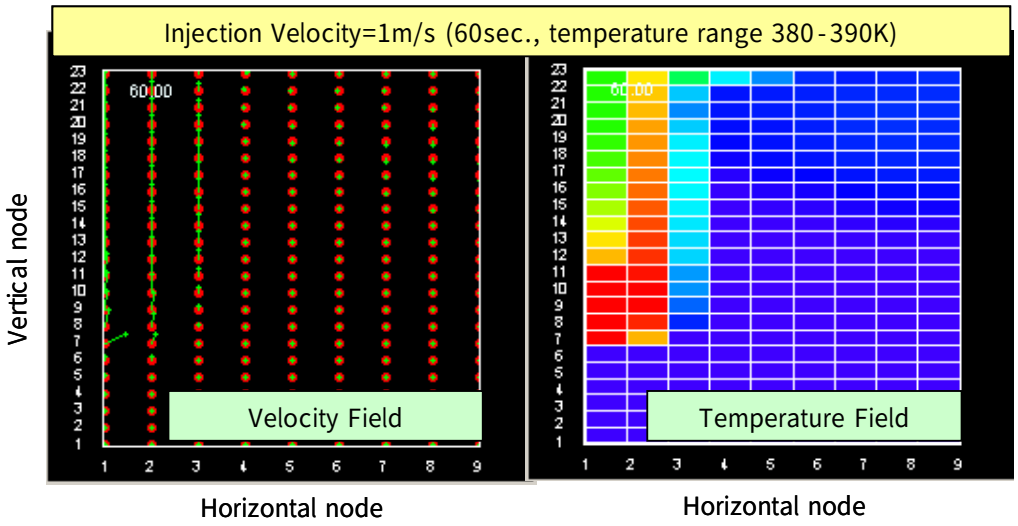



그림 5. 1 m/s 증기분출후 60 초 경과시의 DW2 내부 속도장과 온도장

그림 6은 증기 분출 초기인 10 초 경과후 증기분사 노즐 에서 각각 0.3, 0.6, 0.9 m 떨어진 지점에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 노즐에서 아래, 위로 2개의 노드(node)에 대하여 수평방향 속도($V_x$)를 분사속도에 따라 구별하여 나타내었다.

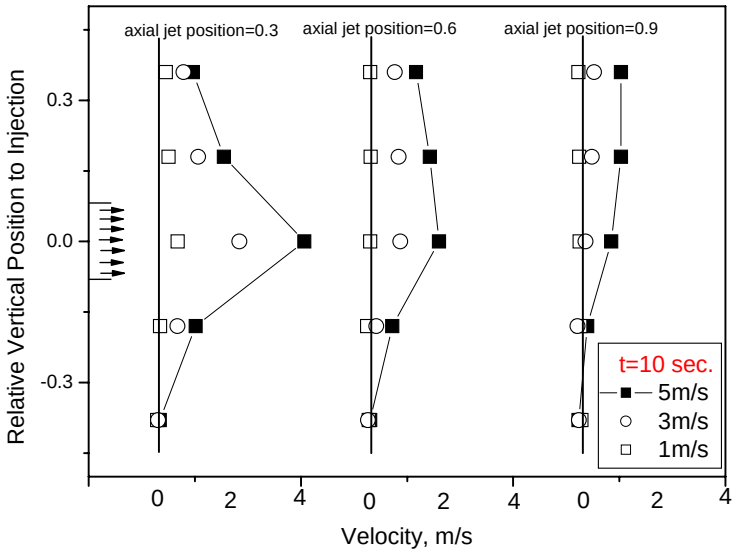



그림 6. 10 초 경과후의 주입구 주변 제트속도 분포

증기분출의 중심속도는 0.3 m 떨어진 위치에서 전형적인 제트의 형상을 보이고 있다. 그러나 입구로부터 멀어짐에 따라 부력의 영향이 강하게 나타나기 시작한다. 1 m/s 분사의 경우, 분사 모멘텀이 약하고 부력의 영향으로 인해 증기제트가 탱크 내부로 깊이 침투하지 못하여 제트류

경계층이 첫번째 노드부터 형성되지 못하고 있다. 반대로 5m/s 분사의 경우에는 입구에서 0.6 m 떨어진 위치까지 제트류의 속도장이 나타나고 있고, 0.9 m 떨어진 위치에서도 수평방향 속도가 1 m/s에 이르는 것을 알수 있다. 노즐 하부의 수평방향 속도는 분사 속도에 관계없이 부력에 의해 급격히 감소하는 모습을 보인다. 이로부터, 부력의 영향은 5 m/s 분출시에도 제트의 속도장에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 이러한 분출입구 근처의 속도장은 시간이 경과해도 지속적으로 유지된다는 것을 확인하였다.

탱크 상층부의 온도변화를 관찰하기 위해 최상단 높이에서 좌, 우의 모서리와 중앙에 위치한 노드의 온도를 살펴보았다. 그림 7은 증기의 분출속도가 5 m/s인 경우이다. 탱크 최상층부의 온도증가가 약 15초 이후 세 위치에서 동시에 시작되고 있음을 알 수 있다.

그림 8에서, 3 m/s로 증기를 분출할 경우 좌측 모서리와 중심부의 온도상승 시점은 5 m/s의 경우와 크게 다르지 않다. 그러나, 우측 모서리 부분의 온도가 약 4초 지연되고 있음을 알 수 있다. 5 m/s로 분출할 때와 가장 큰 차이는 중심부 온도가 좌측 모서리 부분의 온도와 비교하여 크게 높지 않다는 것이다. 즉, 제트가 도달하는 지점의 온도가 상층부 온도분포에 직접적인 영향을 끼치므로 5 m/s의 경우에는 제트의 연장선, 즉 plume이 탱크 상층부의 중심부분으로 이어져 강한 온도상승 효과를 보이고 있다. 3 m/s 분출시에는 제트 plume이 좌측 모서리와 중심부의 중앙부에 도달하였음을 온도분포를 통하여 알 수 있다.

그림 9는 좌측 모서리의 온도가 중심부나 우측 모서리 부분의 온도보다 훨씬 높은 온도를 계속 유지하는 것을 잘 보여주고 있다. 이것은 증기의 분출 속도가 낮을수록 제트의 영향보다 부력의 영향이 상대적으로 큰 영향을 끼쳐 고온의 과열 증기가 탱크 내부를 관통하지 못하고 분출 입구 근처에서 곧바로 상승하기 때문이다.

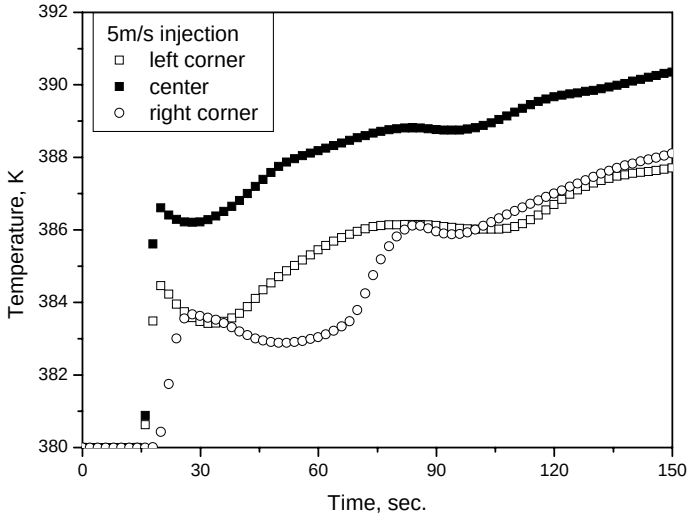



그림 7. 5 m/s 증기분출시의 탱크 상층부 온도 상승 추이

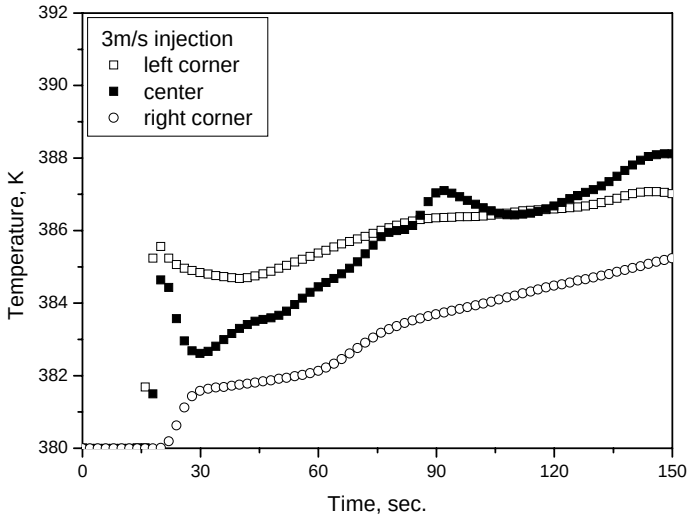



그림 8. 3 m/s 증기분출시의 탱크 상층부 온도 상승 추이

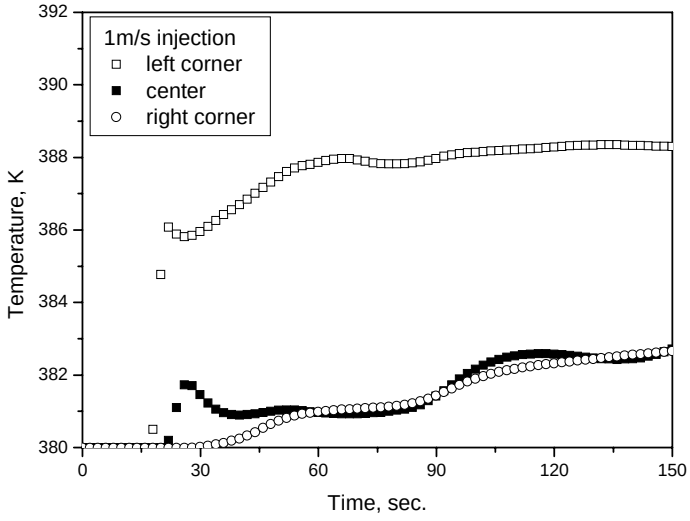



그림 9. 1 m/s 증기분출시의 탱크 상층부 온도 상승 추이

## 4. 결론 및 논의

MARS 코드의 다차원 해석 능력을 OECD/SETH PANDA Tests 예비계산을 통해 평가하였다. 예비계산의 대상은 OECD/SETH PANDA Tests 중 탱크내 증기 분출에 따른 비응축성 가스의 분포와 온도 성층화 등을 보기위한 Test No. 9, 16, 그리고 17 번이다. 실험의 주안점이 되는 분출류의 제트형상과 분출류의 상층 벽면 도달지점, 그리고 상층부

온도변화등을 해석하기 위해 직경 4 m, 높이 8 m인 원통형 공간을 2277개의 노드로 구성하여 해석을 수행였다. 1차원 해석으로는 구현할 수 없는 속도장과 온도의 공간적 분포 차이가 입구 증기의 분출속도에 따라 대조되어 잘 나타나고 있음을 확인하였다. 향후 OECD/SETH PANDA Tests의 결과가 제시되면 MARS 코드의 다차원 해석능력을 실험적으로 검증하는 노력을 계속 수행할 계획이다.

**참고문헌**


[1] OECD, Nuclear Safety Research in OECD Countries, Summary Reports of the Facilities and Programes at Risk (SESAR/FAP), OECD Nuclear Energy Agency, Paris (2001).

[2] G. Yadigaroglu and J. Dreier, OECD SETH Project, The PANDA Tests, First meeting of the Program review Group, Erlangen (2001).

[3] M. Andreani, OECD SETH Projects PANDA Tests, Analytical Activities, 5th Meeting of the Programme Review and 4th Meeting of the Management Board, Erlangen (2003).

[4] 이원재 외, “ 원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/ 최적열수력계통분석코드 개발”, KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소 (2002).

[5] 정법동, 배성원, 이영진, “ 열수력 계통분석코드 MARS의 다차원 컴포넌트, MULTID의 개발”, 춘계원자력 학회 (2003).

[6] Sung Won Bae, Jae-Jun Jeong, Bub Dong Chung , “ MARS 1D Multid Component의 점성응력 모델 개발 및 평가”, 추계원자력학회 (2003).


**감사의 글**


본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.