2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

삼중수소 저장용기 열해석

Heat Analysis of Tritium Storage Vessel

정해용, 이건재
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

정흥석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

중수로 원자로에서 발생하는 삼중수소를 저장하기 위해 개발되어진 저장용기의 열적 측면에서의 안전성을 해석 평가하였다. 현재 삼중수소 저장 방법으로 연구되어지고 있는 티타늄 화합물 저장방식에서 삼중수소의 흡수시 발생하는 열에 대해 저장용기내부의 온도 상승을 모사했다. 삼중수소 저장용기의 열해석을 위해서 Heating 7 전산코드를 사용했으며, 삼중수소의 흡수 실험시에 발생하는 열을 해석 대상으로, 외부 온도 조건을 다르게 변화시키며 모사하여 분석하였다. 모사 결과 흡수시에 발생하는 열에 의해 저장용기의 온도 변화가 있었으나 안전성에 큰 영향을 미칠 정도는 아닌 것을 확인하였다.

Abstract

Heat analysis of tritium storage vessel was accomplished to verify the integrity of vessel at high temperature condition. Now a days, metal hydride is a well established technology for tritium storage and is widely used in the world. Metal hydride (tritide) is a exothermic reaction so it is possible that the temperature of inner vessel increase so high. In this study, when tritium is absorbed in metal (titanium), the temperature of storage vessel is analyzed with a computer code for heat analysis, Heating 7. Through this work, it turned out that the tritium storage vessel could keep its integrity, even though there is the change of temperature in tritium absorption step.

1. 서론

삼중수소 저장용기는 삼중수소를 금속 저장재에 저장하기 위해 저장용기의 역할뿐만 아니라 반응기의 역할도 동시에 수행한다[1]. 따라서 삼중수소의 저장 과정을 통해 반복적으로 열에 노출된다. 금속 저장재의 활성화 단계와 저장단계등에서 고온에 노출되는데, 이때 삼중수소가 저장재와 반응하는 현상은 발열 반응으로서 고온에서 일어나는 반응은 발생열로 인해 온도가 더욱 상승하게 된다[2]. 따라서 이러한 정상적인 반응에서의 여러 가지 반응과 또한 발생할 수 있는 사고시의 여러 가지 상황에 대해 저장 용기가 처할 수 있는 열 환경에 대해 분석하는 작업이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 삼중수소의 저장 용기에 발생할 수 있는 여러 가지 상황에 대해 분석하고 예측하는 작업을 수행하였다. 이러한 작업은 단순히 해석적인 방법으로는 결과를 도출하는데 어려움이 있음으로 기존의 널리 사용되고 있는 코드, HEATING 7을 사용해서 결과를 도출했다.

2. HEATING 7 코드

HEATING 은 범용 열전달 해석 프로그램으로서 정상상태와 전이상태의 열전달 문제를 1, 2, 3차원으로 직교좌표, 원형좌표, 원통형좌표로서 계산할 수 있다[3]. 다양한 물질과 열해석을 위한 변수들을 시간 및 온도에 따라 사용할 수 있다. 열발생률은 시간, 온도, 위치에 따라 설정이 가능하며 boundary 온도 역시 시간과 위치에 따라 설정이 가능하다. 면과 주변 혹은 면과 면사이의 boundary 조건은 온도나 혹은 열속, 대류, 복사와 같은 변수들의 조합으로 설정이 가능하다. HEATING 은 쉬운 input 형태를 가지고 있다.

HEATING 7은 정상상태의 열전달 계산을 위해 extrapolation, direct-solution, conjugate gradient 의 세가지를 이용한 point-successive-overrelaxation iterative method를 사용한다. 또한, 전이상태의 계산은 Crank-Nicolson implicit, Classical Implicit Procedure (CIP), Classical Explicit Procedure (CEP), Levy explicit method 등의 여러 가지 finite-different schemes중에 하나를 사용한다.

- HEATING 7을 이용한 모델링.

1. 실제 문제에 적합한 기하 형태(geometry type)를 선정한다.
2. 구역을 설정한다.
3. 각 구역별 물질을 설정한다.
4. 각 구역별 초기 온도 조건을 설정한다.
5. 열발생 구역을 지정한다.
6. 각 구역별 경계조건을 설정한다.
7. 전체 모델의 격자구조를 설정한다.
8. 필요할 경우, 각 변수에 해당하는 함수를 지정한다.

9. 전이상태에 대한 계산시 시간에 따른 값을 설정한다.
10. 구하고자 하는 결과 형태를 지정한다.
위와 같은 방법으로 각각의 단계별로 입력 항목들을 작성하여 코드의 입력파일을 완성한다. 이렇게 완성된 입력화일을 이용해서 코드를 실행한다.

3. 삼중수소 저장용기 적용 및 결과

앞에서 서술한 바와 같이 HEATING 7 코드는 여러 가지 특징을 가지고 있으며 실제 현상 및 문제에 적용하기 위해 비교적 용이한 특징을 가지고 있다. 하지만 실제 해결하고자 하는 문제에 대한 철저한 분석을 통해서 모델링하는 작업을 거쳐야 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 HEATING 코드의 내용을 분석한 후 대상이 되는 삼중수소 저장용기에 대해 열 해석을 수행하였다.

열해석 코드를 사용한 삼중수소 저장용기에 대한 분석 결과를 도출하기 위해서는 우선적으로 삼중수소 저장용기에 대한 모델링 작업이 필요하게 된다. 이러한 작업은 앞에서 언급한 여러 단계를 거쳐서 이루어지게 된다. 또한 실제 현상을 예측하는데 어려움이 수반된다면 그 항목에 대해서는 가정을 거쳐 분석을 수행하게 된다. 우선적으로 분석을 수행한 삼중수소 용기의 현상은 활성화 과정과 삼중수소의 저장 주입 단계에서 금속 저장재 내에 삼중수소가 흡수 될 때의 발열반응으로 이때 열이 발생하게 된다. 외부의 온도가 고온으로 유지되는 상태에서 용기 내의 저장재 부분에 열이 발생하므로 용기내에 온도가 상승하게 되는데 이때 과연 어느 정도의 온도변화가 발생하는지 예측하고 분석하는 작업을 수행하였다. 우선 이러한 분석을 위해서는 문제에 대한 모델링 작업이 우선적으로 필요하게 된다.

먼저 삼중수소 저장용기에 대한 기하학적 분석을 수행하였다. 삼중수소 저장용기는 원통형의 용기로서 열 해석을 위해서 열 분포가 대칭적이라는 점을 고려하여 x-y 좌표인 직교좌표(rectangular)를 사용하였다. 또한 금속 저장재 내의 중심(용기 중심) 부분에서 가장 열이 많이 발생할 것으로 예측되며 이때 온도 분포는 용기를 중심으로 대칭을 보일것으로 예상되어 용기의 절반 부분을 대상으로 분석을 수행하였다. 본 분석에서 사용한 용기의 개략도는 그림 1에 나타나 있다. ①번은 Ti-sponge를 나타내며 ②번부터 ⑦번까지는 용기 벽인 스테인리스 스틸(316L)이다.

열 해석을 수행하기에 앞서 여러 가지 초기 조건들과 경계 조건들이 필요하다. 먼저 용기의 주변 온도는 450℃와 550℃, 800℃ 세 가지 경우로 설정하였다. 이 온도는 저장용기 내의 금속 저장재를 활성화 하기 위한 온도와 삼중수소를 저장하기 위한 온도로서 이때 발생하는 열을 계산하기 위해 설정한 온도이다. 그리고 중요한 변수로서 열발생율에 대한 조건을 설정하였다. 삼중수소를 저장하기 위한 금속 저장재로서 Ti-sponge를 사용한다. Titanium과 삼중수소의 반응은 M/H의 비율을 1로 가정하기 때문에 같은 mole 비로 반응이 일어난다고 볼 수 있다. 또한 Titanium과 삼중수소가 반응할 때 흡수되는 삼중수소의 mole당 약 20-40kcal의 에너지가 방출되는 것으로 알려지고 있다. 삼중수소 저장용기 내

에 투입되는 Ti-sponge의 양이 850g 인 것을 고려해서 계산을 하면 삼중수소와 금속저장재(Ti-sponge)와의 반응시 발생하는 열 발생율은 약 4.5e6 W/m^3으로 가정할 수 있다. 삼중수소가 금속 저장재내에 흡수되는 여러 가지 실험 결과를 살펴보면 이러한 흡수 과정은 대략 3분내에 평형상태에 이르는 것으로 보고되고 있다[4]. 따라서 본 연구에서는 흡수 과정 중에 발생하는 열 발생율을 그림 2와 같이 시간에 따른 분포로서 설정하였다. 이러한 분포가 실제 현상과 완벽히 일치한다고 확신할 수는 어렵지만 여러 실험을 통해 비교해보면 신뢰성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 이렇게 열 발생율이 시간에 따라 다르게 나타나기 때문에 이에 따라 온도변화도 시간에 따라 살펴봐야 할 필요성이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 초기로부터 1분마다 결과를 도출하였다. 1분, 2분, 3분 매 1분마다 최대온도와 최저온도를 도출하고 또한 그 위치를 확인하였다.

용기외부는 활성화 혹은 저장단계를 위해 가열되어있는 상태이므로 앞서 말한 온도로서 설정되어 있으며 공기의 대류에 의해 냉각이 이루어 진다고 설정하였다. 열 해석을 위한 다른 여러 가지 변수들 값은 표 1에 제시하였다.

(1) 초기온도 450℃ 설정시

활성화를 위한 기본적인 온도로서 초기 온도를 450℃로 설정했을 때의 분석 결과를 도출했다. 열 발생율이 2분 정도 지속되므로 그 이후에 평형상태에 도달하게 되면 다시 초기온도로 돌아 가는 결과를 보여줄 것으로 예상된다. 우선 시간별 최고 온도와 최저 온도 및 각 위치를 표 2에 나타내었다. 위치는 코드 계산시 x-y 격자를 구분하여 결과를 나타낸 것이다. 그림 3에는 시간에 따른 열발생율과 최고 온도와의 변화를 함께 나타내었다. 표 2에 나타난 결과를 살펴보면 용기내 최고 온도가 약 650℃ 정도 까지 증가하는 것을 볼수 있다. 이때 최고 온도의 위치는 용기내 저장 금속재의 중심 부분인 것으로 결과가 도출됐다. 약 3분 정도 시간이 경과한 시점에서 가장 높은 온도가 나타났다.

(2) 초기 온도 550℃로 설정시

초기 온도를 550℃ 설정했을 경우, 도출된 결과는 표 3과 그림 4과 같다.

(3) 초기 온도 800℃로 설정시

초기 온도를 800℃ 설정했을 경우, 도출된 결과는 표 4와 그림 5과 같다.

위의 세가지 온도에 대한 결과를 살펴보면 반응 후 약 3분이 경과된 시점에서 용기내 온도가 가장 높게 상승하는 것으로 확인되었으며 온도의 상승폭은 약 200℃ 정도이다. 현재 모사한 반응의 상황은 외부 온도 조건이 초기 온도 조건으로 계속 유지되는 것으로 설정되어있기 때문에 열발생이 없는 3분 후에도 온도가 서서히 감소하는 것으로 결과가 나오고 있다. 따라서 이렇게 초기조건과 외부조건등에 대해 다양한 설정을 통해 여러 가지 상황에 대한 모사가 이루어진다면 안전성 확보를 위한 기본 자료로서 큰 역할을 할 수 있을 것으로

기대된다.

4. 결론 및 토의

삼중수소를 저장용기 내에 안전하게 저장하기 위해서는 정상적인 반응에서의 여러 가지 반응과, 또한 저장시 발생할 수 있는 사고시의 여러 가지 상황에 대해 저장 용기가 처할 수 있는 열 환경에 대해 분석하는 작업이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 삼중수소의 저장 용기에 발생할 수 있는 여러 가지 상황에 대해 분석하고 예측하는 작업을 수행하였다. HEATING 코드를 사용해서 삼중수소 저장 단계별 저장용기 내의 온도 변화를 분석하였는데 저장용기의 내의 온도가 약 200℃ 정도 상승하는 결과가 도출되었다. 이러한 결과들을 좀더 수정 보완하고 여러 가지 경우에 대해 결과를 도출한다면 삼중수소 저장용기의 안전성을 확보하는데 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과기부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA, Safe Handling of Tritium, IAEA Technical Report Series No.324, 1991
2. F.A. Lewis, A. Aladjem, Hydrogen Metal System I, Scitec Publications, 1996
3. ORNL, Multidimensional, Finite-Difference Heat Conduction Analysis Code System, 1998
4. 한국원자력연구소, 농축트리튬 안전성 평가 연구, KAERI/CM/-438/2000, 2000

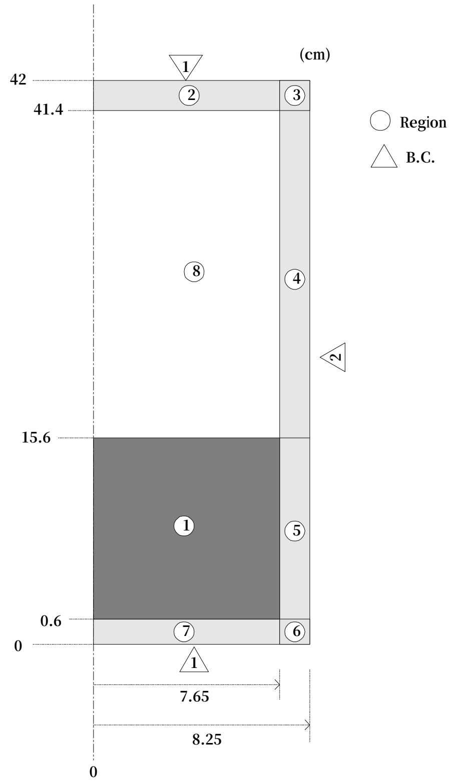

그림 1. 열 해석에 사용된 저장용기 개략도

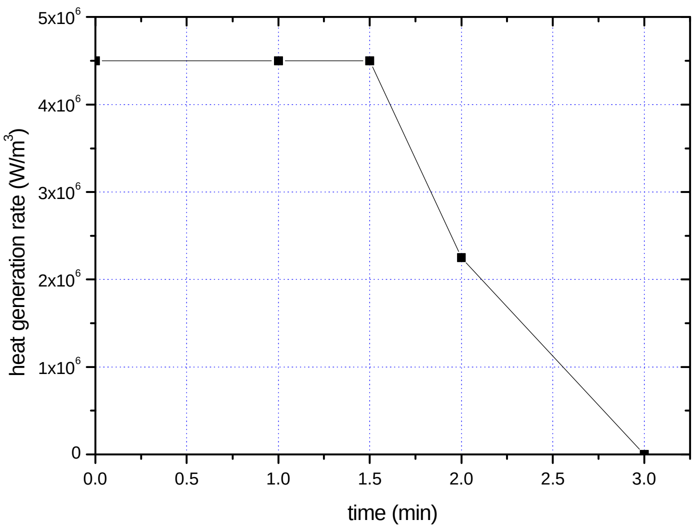

그림 2. 시간에 따른 열 발생율

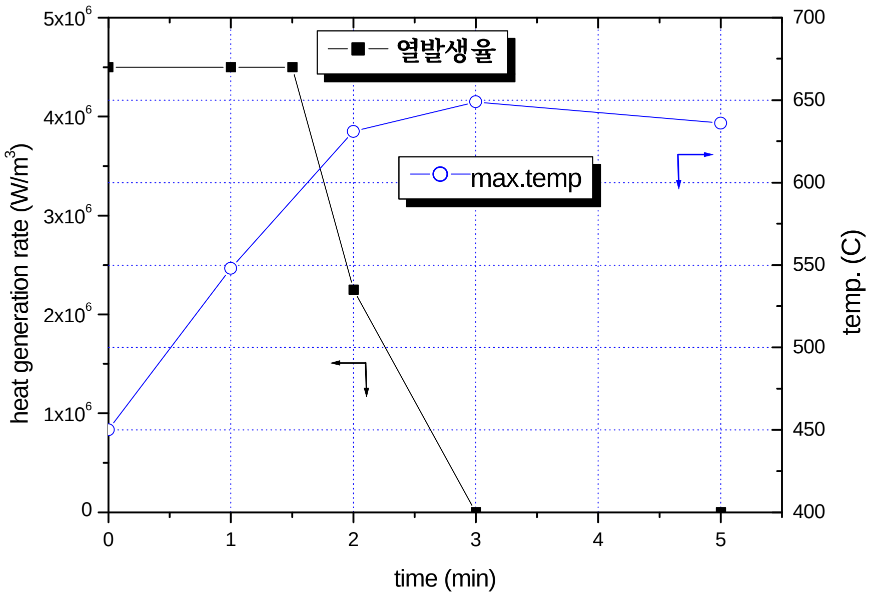

그림 3. 초기 조건 450℃시의 max. 온도

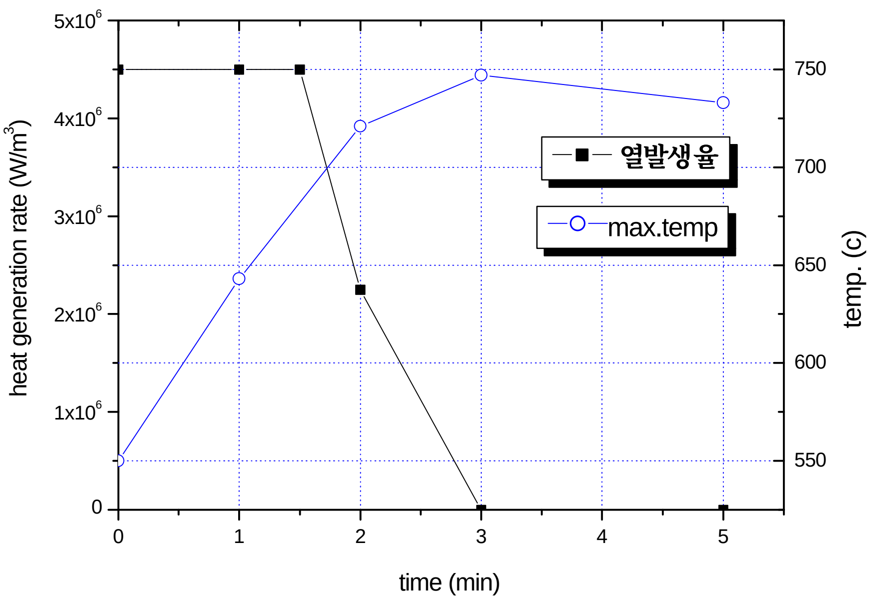

그림 4. 초기 조건 550℃시의 max. 온도

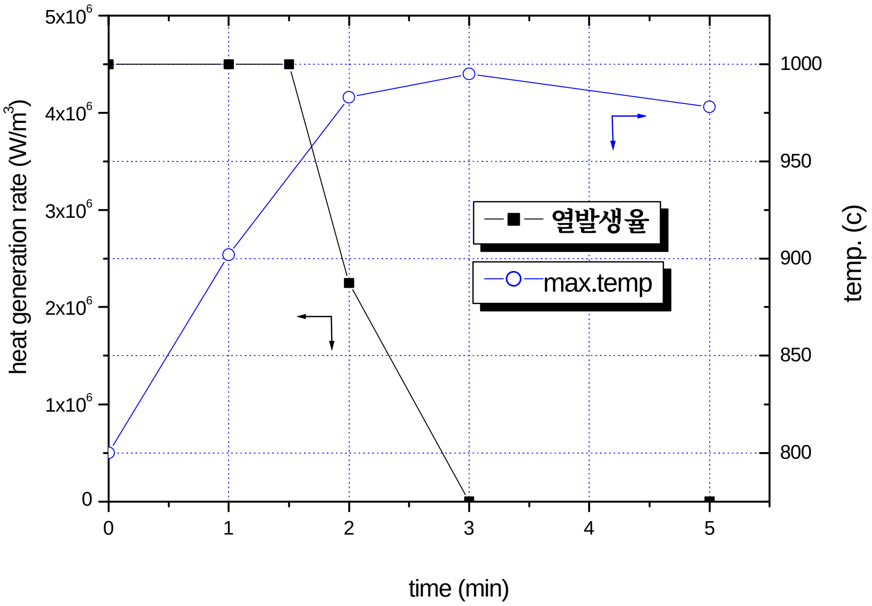

그림 5. 초기 조건 800℃시의 max. 온도

표 1. 사용된 여러 가지 변수값

변수	Ti	SUS316L
열전달율(conductivity) (W/m K)	19.7 @800K	14.4 @800K
밀도(density) (kg/m^3)	4500	7817
비열 (specifc heat) (J/kg K)	611	461
열대류계수(공기)	20 W/m^2K	

표 2. 초기 조건 450℃시의 온도 변화

temp time	t=0 (min)	1	2	3	5
Max. Temp (℃) 위치	450	548 (0cm, 11cm)	631 (0cm, 11cm)	649 (0cm, 12cm)	636 (0cm, 12cm)
Min. Temp (℃) 위치	450	450 (8.25cm, 30cm)	450 (8.25cm, 30cm)	450 (8.25cm, 31cm)	450 (0cm, 12cm)

표 3. 초기 조건 550℃시의 온도 변화

temp time	t=0 (min)	1	2	3	5
Max. Temp (℃) 위치	550	643 (0cm, 11cm)	721 (0cm, 11cm)	747 (0cm, 12cm)	733 (0cm, 12cm)
Min. Temp (℃) 위치	550	550 (8.25cm, 30cm)	550 (8.25cm, 30cm)	550 (8.25cm, 31cm)	550 (8.25cm, 31cm)

표 4. 초기 조건 800℃시의 온도 변화

temp time	t=0 (min)	1	2	3	5
Max. Temp (℃) 위치	800	902 (0cm, 11cm)	983 (0cm, 11cm)	995 (0cm, 12cm)	978 (0cm, 12cm)
Min. Temp (℃) 위치	800	800 (8.25cm, 30cm)	800 (8.25cm, 30cm)	800 (8.25cm, 31cm)	800 (8.25cm, 31cm)