

소멸처리로 중성자원 고체표적물의 온도상승에 관한 연구

조재선, 허병길, 정창현

서울대학교

송태영, 박원석

한국원자력연구소

요 약

고준위 방사성 폐기물 처분과 관련이 있는 가속기구동 소멸처리로는 미임계로이기 때문에 별도의 중성자원이 필요하다. 가속기에서 나오는 양성자를 받아 중성자를 발생시키는 중성자원으로 사용될 표적물로서 거론되는 방안중에 하나인 고체표적시스템에 대한 열전달 예비계산을 수행하였다. 고체표적물의 물질은 텅스텐을 대상으로 하였으며 표적시스템은 원통형구조를 가정하였다. 양성자 조사에 의한 텅스텐 물질의 핵파쇄반응으로 인한 내부발열을 모사하여 표적물내에서의 온도상승속도와 온도분포를 조사하였다. 계산결과 별도의 표적물에 대한 냉각시스템이 없는 상황에서 30~37초만에 국부적으로 텅스텐의 온도가 녹는점 이상으로 상승하는 결과를 보였다. 따라서 고체표적물 시스템을 소멸처리로에서 사용하기 위해서는 표적물을 냉각시키기 위한 다각도의 방안이 모색되어야 한다.

1. 서 론

사용후 핵연료의 처분과 관련하여 매립방식의 일종인 심지층처분방식에 대한 대안 또는 보조적 수단으로 핵변환을 이용한 처분 방식들이 연구되고 있다. 이러한 방식들중에 하나인 가속기구동 소멸처리로에 대한 연구가 국내·외적으로 수행중에 있다. 가속기구동 소멸처리로의 설계에 있어서 현재 연구되고 있는 분야는 가속기 분야, 핵연료 분야, 냉각재와 관련한 열수리학 분야 그리고 표적시스템 분야 등을 들수 있다. 소멸처리로는 미임계상태에서 가동하는 원자로이기 때문에 별도의 중성자원을 필요로 한다. 따라서 소멸처리로는 가속기에서 조사되는 양성자를 받아 핵파쇄

반응을 일으켜 중성자를 발생시키는 표적물을 필요로 한다.[1]

가속기구동 소멸처리로를 구성하는 표적물은 직접적으로 가속기로부터 입사되는 수 GeV의 고 에너지 양성자에 의해 핵파쇄 반응을 일으키게 된다. 이렇게 핵파쇄 과정으로부터 얻어진 수 많은 중성자는 미입계로내에서 다시금 수십배로 증폭되어 장반감기 핵종들을 단반감기의 핵종으로 변환시킨다. 그러므로, 가속기구동 미입계로의 표적물로 고려되는 물질들은 우선 주어진 입사 에너지에서 단위 입자당 중성자의 발생율이 커야 하며 핵파쇄 반응을 통한 표적 자체의 방사화가 작고 그 후속 방사화 물질의 반감기가 작아야 하며 핵파쇄 반응에 의한 열발생량이 작아야 한다. 또한 마지막으로 반응로의 중성자 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위한 중성자 반응 단면적이 작아야 한다.[2]

현재 고려되어지고 있는 표적 물질로는 납, 납-비스무스 합금등의 액체표적물과 텅스텐을 사용하는 고체표적물로 크게 분류할 수 있다. 표적물이 핵파쇄반응을 일으킬 때 양성자 빔 에너지의 일부분이 표적내에 저장되고 이러한 에너지로 인해 표적물의 온도는 상승하게 된다. 이와 관련한 표적물의 온도상승과 냉각방안에 대해 많은 연구가 수행중에 있다. 본 연구에서는 고체표적물에 초점을 맞추어 용융온도가 3410℃인 텅스텐을 대상으로 텅스텐이 용융온도까지 올라가는 시간과 표적물내에서의 온도분포를 평가하였다.

2. 계산대상 모델 및 가정

2.1 표적물 구조

현재 소멸처리로 표적물시스템과 관련하여 표적물을 원자로 냉각재와 분리하여 표적시스템을 구성하는 방안(고체 및 액체 표적물)과 냉각재와 표적물 구분없이 냉각재를 표적물로써 동시에 이용하는 방안(액체표적물) 등이 제시되고 있다. 본 연구에서는 표적시스템이 냉각재와 분리된 고체표적물에 초점을 맞추어 계산을 수행하였다. 표적물의 열전달을 계산하기 위한 구조는 한국원자력연구소에서 제시한 원통형 구조를 대상으로 하였으며 표적물의 물질은 텅스텐을 선정하였다.[3] 구조물의 크기는 지름 30cm, 높이 50cm이며 계산에서는 2차원 대칭 원통구조를 가정하였다. 이러한 구조를 높이방향(z방향)으로 10개의 간격으로 나누었고 반경방향(r방향)으로 6개의 간격으로 나누었다. 따라서 모두 60개의 계산 cell을 갖는다.

2.2 표적물 열생성량

표적물은 양성자를 받아 핵파쇄반응을 일으킬 때 높은 에너지를 발생시키며 이로 인해 표적물의 온도는 상승하게 된다. 본 연구에서는 이러한 에너지를 모사하기 위해 한국원자력연구소에서

LAHET 코드로 모사하여 계산한 원통형 표적물의 각 위치에서의 열생성량을 각각의 cell에서의 열원으로 가정하였다.[3] 생성되는 열량은 1GV, 1mA의 양성자가 표적물에 입사되는 것을 모사하여 얻은 데이터들이다. 그림 1은 계산 cell과 각각의 cell들이 갖는 열생성량을 나타내고 있다. 여기서 열생성량은 W/cm^3 의 단위를 갖는 값들이다.

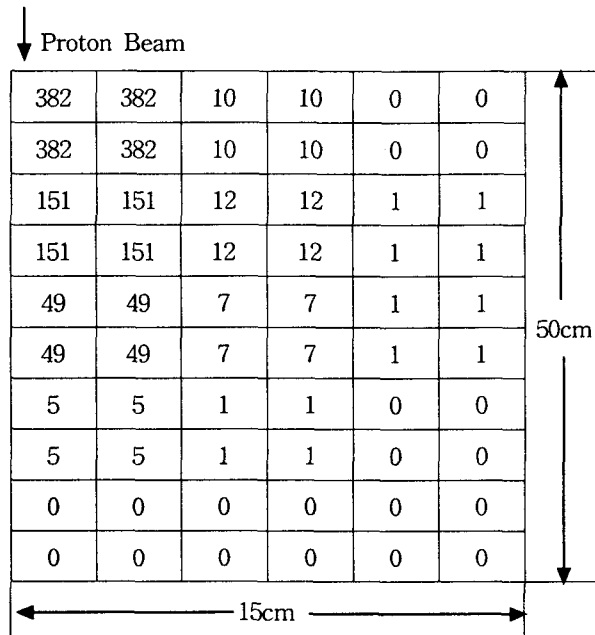


그림 1. 계산 cell 및 각 cell에서의 열생성량

3. 계산수행 및 결과

본 연구에서는 고체 텅스텐을 대상으로 계산을 수행하였기 때문에 열전도방정식만을 취급하면 된다. 앞장에서 언급한 구조에서의 계산을 수행하기 위해 원통형 대칭 2차원 열전도방정식을 수립하고 이에 대한 수치해석 계산을 수행하였다. 비정상상태 2차원 열전도방정식은 다음과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S \quad (1)$$

여기서 오른쪽항의 S항이 그림 1에서 나타낸 각 cell에서의 열생성량이 된다. 표적물내에서의 온도상승을 보수적으로 계산하기 위해 모든 경계조건은 단열조건을 적용하였다. 계산인자는 텅스텐의 초기온도로 설정하였으며 그값은 300, 400, 500, 600°C를 각각 적용하였다.

표적물질로 사용된 텅스텐은 0℃에서부터 1000℃까지 열전도도가 182~114(W/m-K)의 범위를 가지며 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.[3] 이 데이터를 바탕으로 온도에 대한 열전도도 함수를 도출하여 계산에 적용하였다. 온도에 대한 텅스텐의 열전도도 식은 아래의 식과 같으며 그림 2는 온도에 대한 텅스텐의 열전도도 데이터와 도출한 함수를 보여주는 그림이다.

$$k = 70.9 \exp(-T/360.6) + 111.5 \quad (2)$$

해석결과 텅스텐 표적물은 양성자 빔을 받기 시작한 후 30~37초만에 빔을 받는 부분이 용융온도에 도달하는 결과를 보였다. 그림 3은 표적물의 초기온도 조건에 따라 온도가 가장 높은 지점인 표적물내 빔을 받는 위치에서 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 이 지점은 그림 1에서 열생성량 값이 382W/cm³인 곳이다. 온도상승은 네가지 경우 모두 비슷한 경향을 보이며 초기온도 조건에 비례하여 선형적인 변화를 보인다. 초기온도를 300℃로 가정하였을 때는 37초만에 텅스텐의 용융온도(3410℃)까지 도달하였으며 초기온도가 600℃인 경우에는 30초만에 용융온도까지 도달하는 결과를 보였다. 그림 4는 표적물의 초기온도가 500℃인 경우에 표적물내의 전체온도분포를 10, 20, 30, 40 초일 때에 대해 각각 나타내는 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 빔을 받는 지점과 받지 않는 지점들간의 온도차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 또한 표적물내에서 온도가 가장 높은 곳과 가장 낮은 곳의 온도차는 시간이 경과함에 따라 점점 커지는 경향을 보인다. 10초가 경과했을때는 온도차가 1100℃정도 되며 30초에서는 2400℃이상의 온도차가 발생하는 결과를 보였다.

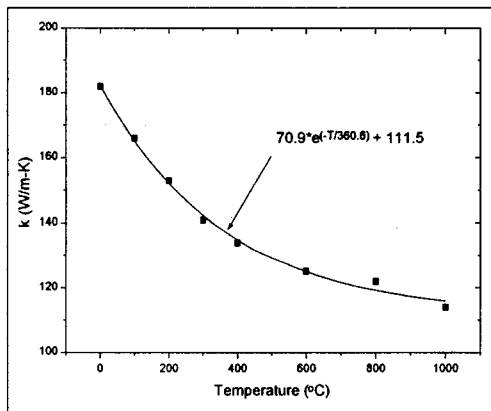


그림 2. 온도에 대한 텅스텐 열전도도 변화 및 도출함수

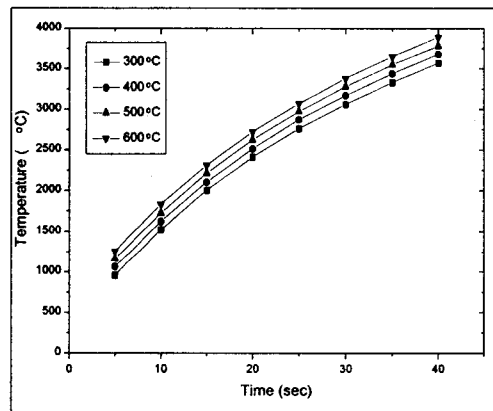
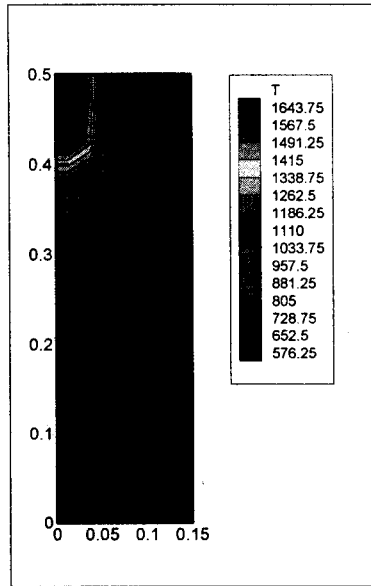
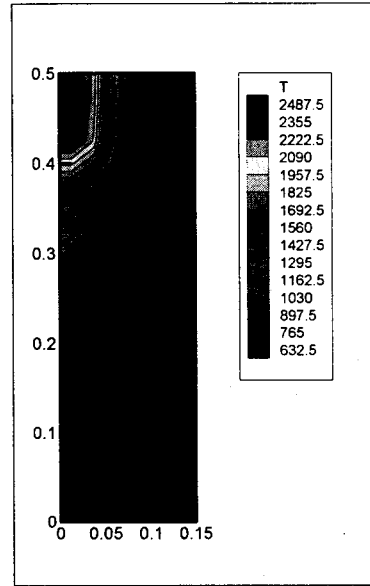


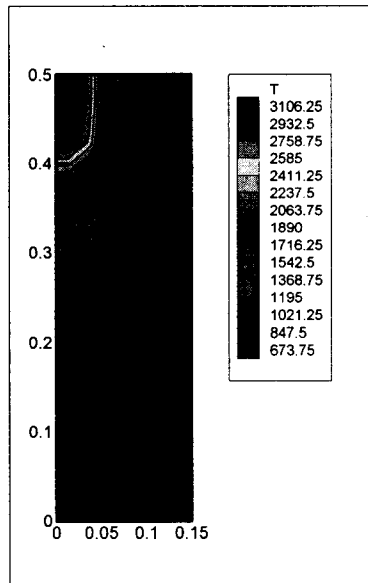
그림 3. 초기온도조건에 따른 표적물내에서의 최고온도 변화



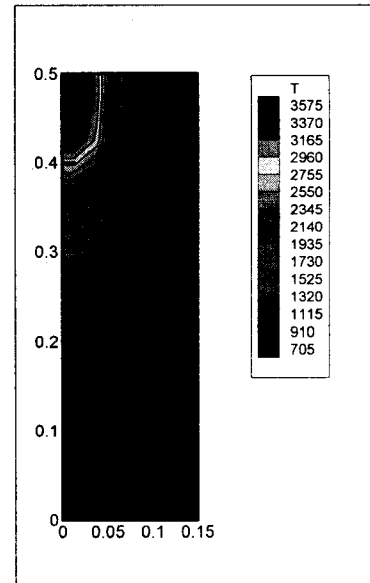
(a) 10 sec



(b) 20 sec



(c) 30 sec



(d) 40 sec

그림 4. 텅스텐 표적물내에서의 온도분포 (초기온도조건 : 500°C)

4. 결 론

소멸처리로의 표적시스템로서 제시되고 있는 방안들중에 하나인 텅스텐을 이용하는 고체표적물에 대해서 온도상승을 포함한 열전달 해석을 수행하였다. 양성자 입사에 의한 핵파쇄반응으로 인한 열생성량을 모사하였으며 해석결과 초기온도 조건에 따라 양성자 입사후 30~37초만에 표적물이 국부적으로 용융온도까지 상승하는 결과를 보였다. 또한 표적물내에서 온도가 가장 높은 지점과 낮은 지점들간의 온도차가 1000~2000℃ 이상 발생하는 결과를 보였다. 본 연구를 통해 고체표적물을 냉각시키기 위한 별도의 시스템이 없으면 현재의 모델은 소멸처리로내에서 사용할 수 없음이 밝혀졌다. 따라서 양성자 입사후 온도가 급격히 상승하는 고체표적물을 소멸처리로에서 사용하기 위해서는 표적물을 냉각시키기 위한 획기적인 방안이 모색되어야 하며 표적물내에서의 온도차를 줄이기 위해 표적물의 크기 및 구조에 대한 심도있는 연구가 수행되어야 한다. 또한 양성자 입사에 의한 핵파쇄시 나오는 에너지가 작으면서 용융온도가 높은 물질에 대한 연구도 병행되어야 한다.

참고문헌

- [1] 박원석 등, "장수명핵종 핵변환 기술개발", KAERI/RR-1638/95, 1996
- [2] Takahito Nishida, "Physical Features of Target and Blanket", Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste, IAEA-TECDOC-985, pp. 32-43, 1997
- [3] T. Y. Song, et. al., "The Characteristics of Lead and Tungsten Targets Used in the Accelerator-Driven Subcritical Reactor", APAC'98 (In Progress), 1998
- [4] J. H. Lienhard, *A Heat Transfer Textbook*, Prentice-Hall, Inc., USA, 1981