

50MeV 양성자쪼임에 의한 세라믹스재료의 열력학적특성변화 및 수명결정

송일심, 채철, 리금석

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《원자력을 생산에 받아들이기 위한 연구사업을 전망성있게 진행하며 방사성동위원소와 방사선을 공업과 농촌경리를 비롯한 여러 부문들에 널리 적용하여야 할것입니다.》

(《김일성전집》 제27권 391페이지)

관성핵융합과 고에너지물리, 가속장치에 의한 초중수소생산 등에서 강전류양성자속의 재료쪼임효과[1]에 대한 연구는 중요한 의의를 가진다. 최근 가속된 양성자로 무거운 표적을 때릴 때 발생하는 파열중성자를 리용하는 가속기구동혼성로가 새로운 에너지원 천개발과 장수명핵폐연료처리의 리상적인 수단으로 평가되고있다. 이로부터 류체탄소성모형을 리용하여 양성자와 전자속을 여러가지 재료에 쪼일 때 발생하는 열력기파와 그것의 수송 및 재료의 파괴특성에 대한 연구들[2, 3]이 많이 진행되고있다.

우리는 3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자와 세라믹스평판재료의 호상작용과정을 모의할 때 열호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위한 방도를 제기하고 몇가지 열력학적특성을 연구하였다.

1. 고에너지립자속의 재료쪼임

고에너지립자속을 재료에 쪼일 때 립자는 순간적으로 에너지를 잃으며 재료내부에서는 압축과 팽창현상이 일어나게 된다.

압축구역과 팽창구역에서의 물질상태방정식은 다음과 같다.

압축구역($\rho > \rho_0$)

$$p = p_H + \rho_0 \Gamma_0 (e - e_H) \quad (1)$$

여기서 $p_H = \frac{c_0^2(v_0 - v)}{[v_0 - \lambda(v_0 - v)]^2}$, $e_H = \frac{1}{2} p_H (v_0 - v)$ 이다.

팽창구역($\rho \leq \rho_0$)

$$p = \rho \left[\gamma - 1 + (\Gamma_0 + \gamma + 1) \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \right] \left\{ e - e_s \left[1 - \exp \left(\frac{N \rho_0}{\rho} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \right) \right] \right\} \quad (2)$$

여기서 c_0 과 λ_0 은 열력기파의 속도 D 와 립자의 속도 v 사이의 선형관계를 반영한 재료파라미터, Γ_0 은 그레네이쎈결수, e_s 는 고체의 비승화에너지, $N = c_0^2 / (\Gamma_0 e_s)$ 는 기화된 다음의 재료상수, γ 는 비열비이다.

여기서 중요한것이 열력기파의 발생구역 즉 대전립자와 재료물질내부에 존재하는 전

자들과의 호상작용구역을 확정하는것이다.

각전자의 결합효과로부터 생기는 보정은 입사입자의 에너기가 작을수록, 무거운 매질일수록 커지므로 이것을 고려하면 평균이온화손실량은 다음과 같이 표시된다.

$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{4\pi^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 m v^2} N Z \left[\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \delta - U \right] \quad (3)$$

여기서 δ 와 U 는 각각 밀도효과와 K 및 L각전자의 결합효과를 고려하는 보정항이다.

$$\rho = \frac{ze^2}{(4\pi\epsilon_0)mv^2}, \quad \rho_{\text{최대}} = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 v} \left(\frac{2}{mI} \right)^{1/2}$$

여기서 ρ 는 대전립자와 전자들사이의 호상작용을 특징짓는 표적거리이며 $\rho_{\text{최대}}$ 는 최대 표적거리로서 이온화손실에 의한 재료의 열발생구역과 일치한다.

$E_p = 50\text{MeV}$ 일 때 세라믹스속에서 침투깊이에 따르는 $\rho_{\text{최대}}$ 의 변화는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 $\rho_{\text{최대}}$ 는 표적물질을 통과하면서 초기에는 큰 변화가 없다. 그러나 에너기가 작아지게 되면 $\rho_{\text{최대}}$ 는 급격히 커진다. 이것은 대전립자의 속도가 떨어지면서 표적거리가 급격히 커지며 이와 함께 표적물질속에서 열발생구역이 급격히 넓어진다는것을 의미한다.

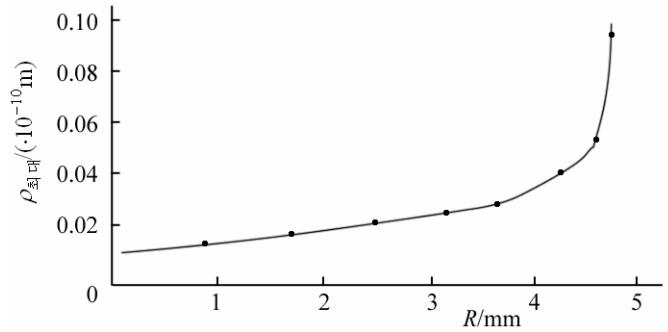


그림 1. 침투깊이에 따르는 $\rho_{\text{최대}}$ 의 변화

2. 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 열력학적특성변화

재료의 표면층이 자리표면에 평행인 무한히 작은 평행6면체로 되어있으며 그것의 온도가 일정하고 요소체적이 자유롭게 팽창할수 있으면 평행6면체의 변형성분들은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon'_x = \epsilon'_y = \epsilon'_z = \alpha T, \quad \gamma'_{xy} = \gamma'_{yz} = \gamma'_{xz} = 0$$

여기서 $\alpha = c/3$ 는 온도에 의한 길이팽창계수이고 c 는 체적팽창계수이다.

물체의 완전변형성분과 응력성분을 각각 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \lambda_{xy}, \lambda_{yz}, \lambda_{zx}, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 로 표시하면 열응력성분과 탄성변형성분은 후크의 법칙에 따라 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\epsilon''_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E, \quad \epsilon''_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]/E, \quad \epsilon''_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E$$

$$\gamma''_{xy} = \tau_{xy}/G, \quad \gamma''_{yz} = \tau_{yz}/G, \quad \gamma''_{zx} = \tau_{zx}/G \quad (4)$$

완전변형성분과 변위성분 u, v, w 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

식 (5)를 리용하여 라그랑주운동방정식을 풀면 열탄성방정식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned}
 (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial x} + G \nabla^2 u + \rho \left(X - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \\
 (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial y} + G \nabla^2 v + \rho \left(Y - \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial y} &= 0 \\
 (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial z} + G \nabla^2 w + \rho \left(Z - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

온도가 주어지고 초기조건과 경계조건이 주어진 경우 변위와 응력을 구할수 있지만 해석적인 풀이를 구할수 있는 경우가 많지 않으므로 우리는 SolidWorks로 열호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위한 방도를 제기하였다.

통과시간이 같고 양성자의 속도변화가 그리 심하지 않도록 양성자주행구간을 적당한 구간으로 분할하고 개별적인 구간에서 발생한 열이 재료의 탄성특성을 변화시킨다고 가정하여 모의기하를 그림 2와 같이 작성하였다.

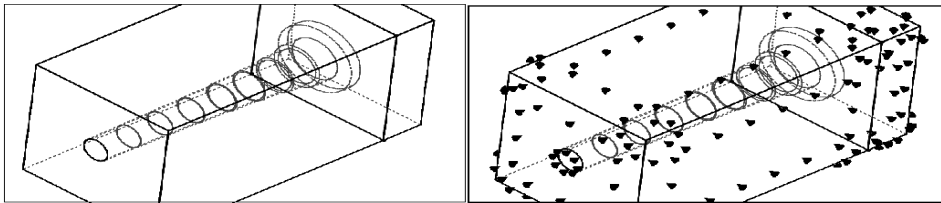


그림 2. 양성자와 세라믹스평판재료의 열호상작용모의기하

양성자와 세라믹스평판재료의 열호상작용모의파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 양성자와 세라믹스평판재료의 열호상작용모의파라미터

E/MeV	$\Delta E/\text{MeV}$	$\Delta R/\text{mm}$	$v/(\cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta t/(\cdot 10^{-10} \text{ s})$	$\rho/(\cdot 10^{-10} \text{ m})$	P/W
50	2	1.5	3.45	4.35	0.017 7	0.073 6
48	2	1.4	3.31	4.23	0.018 4	0.075 7
46	2	1.4	3.17	4.41	0.019 2	0.072 5
44	2	1.4	3.04	4.61	0.020 1	0.069 4
42	2	1.3	2.90	4.49	0.021 0	0.071 3
40	2	1.2	2.76	4.35	0.022 1	0.073 6
38	2	1.2	2.62	4.58	0.023 2	0.069 9
36	2	1.2	2.48	4.83	0.024 5	0.066 2
34	2	1.0	2.35	4.26	0.026 0	0.075 1
32	2	1.04	2.21	4.71	0.027 6	0.067 9
30	2	0.99	2.07	4.78	0.029 4	0.066 9
28	2	0.92	1.93	4.76	0.031 6	0.067 2
26	2	0.86	1.79	4.79	0.039 8	0.066 8
24	2	0.82	1.66	4.95	0.036 8	0.064 6
22	2	0.75	1.52	4.94	0.040 2	0.064 8
20	2	0.70	1.38	5.07	0.044 2	0.063 1
18	2	0.63	1.24	5.16	0.049 1	0.062 0
16	2	0.57	1.10	5.28	0.055 2	0.060 6
14	2	0.51	0.99	5.43	0.063 1	0.058 9
12	2	0.45	0.83	5.64	0.063 1	0.069 0
10	2	0.32	0.69	6.71	0.075 6	0.047 7
8	2	0.37	0.55	6.79	0.088 3	0.055 2
6	2	0.24	0.41	6.83	0.110 4	0.055 2
4	2	0.16	0.28	6.88	0.220 9	0.063 1
2	2	0.07	0.14	6.92	0.441 7	0.067 2

재료의 열력학적파괴를 특징짓는 최대당김응력 9.237MPa를 파괴판정조건으로 설정하였을 때 모의파라미터들은 표 2와 같다.

표 2. 양성자와 세라믹스평판재료의 호상작용과정 모의파라미터

파라미터	값	파라미터	값
모형류형	선형, 등방성, 탄성	팽창비	0.49
항복응력/Pa	$9.237 \cdot 10^6$	밀도/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
인장응력/Pa	$1.378 \cdot 10^7$	절단결수/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	$2.9 \cdot 10^6$
탄성결수/Pa	$6.1 \cdot 10^6$	열팽창률/ K^{-1}	$6.7 \cdot 10^{-4}$

3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자조임에 의한 세라믹스평판재료의 열력학적특성변화를 모의한 결과는 다음과 같다.

정상상태에서 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 열분포에서 중심부와 양성자의 루적부위에서는 온도가 1 330℃로서 가장 높고 양성자입사면에서는 944℃로서 가장 낮다.

비정상상태에서 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 응력분포에서 양성자입사면과 양성자루적부위에서의 응력은 0.001 3MPa로서 항복응력(9.237MPa)에 비하여 아주 작으므로 재료의 물리적손상을 초래하지 않는다.

비정상상태에서 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 변위가 가장 심하게 나타난 곳은 재료의 양성자입사부위로서 이때 변위는 0.458 6mm이다.

비정상상태에서 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 변형분포에서 변형이 가장 심하게 나타난 곳은 양성자의 입사면부위와 재료의 모서리부위로서 최대변형률은 0.194 2이다.

비정상상태에서 50MeV 양성자조임에 의한 세라믹스재료의 변형방향분포는 양성자의 입사방향과 수직으로 향하였다.

재료의 수명결정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$T = P / (P_0 \cdot \Phi)$$

여기서 T 는 재료의 수명, P 는 재료의 항복응력, P_0 은 입사입자의 단위응력, Φ 는 립자흐름세기이다.

립자속이 126개/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)인 50MeV 양성자로 세라믹스재료를 조일 때 재료의 수명은 6.5d로서 측정값과 일치하였다.

모의결과 논문에서 제기한 방법으로 세라믹스재료의 열력학적특성과 수명을 정확히 평가할수 있다는것을 알수 있다.

맺 는 말

1) 3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자($E_p=50\text{MeV}$)조임한 세라믹스재료의 열력학적특성변화를 모의할 때 열호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위한 방도를 제기하였다.

2) 3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자($E_p=50\text{MeV}$)조임한 세라믹스재료의 열력학적특성변화를 모의하고 재료의 수명을 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. K. Corzine; Radiation Damage Calculation for the Production of Tritium Program[D], North Carolina State University, 23, 1999.
- [2] Omid Zeynali et al.; Advance in Applied Science Research, 3, 1, 446, 2012.
- [3] 汤文辉 等; 物态方程理论及计算概论, 国防科技大学出版社, 201, 1991.

주체105(2016)년 12월 5일 원고접수

Thermodynamic Characteristics Change and Determination of Life of Ceramics Material by 50MeV Proton Irradiation

Song Il Sim, Chae Chol and Ri Kum Sok

We suggested the means in order to overcome the limitation of thermal interaction radius and interaction time when simulated the thermal and dynamic characteristics change of ceramics material by positron ($E_p=50\text{MeV}$) irradiation with 3D design and mechanics simulation program SolidWorks.

And we determined the life of material by simulating the thermal and dynamic characteristics change of ceramics material by proton ($E_p=50\text{MeV}$) irradiation with SolidWorks.

Key words: proton irradiation, thermodynamic characteristics, ceramics