

50MeV 양성자쪼임에 의한 AI재료의 열력학적특성변화

채철, 최명신, 김금석

위대한 수령 김일성동지께서는 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 에너지원천개발과 장수명핵폐연료처리의 리상적인 방법으로 평가되고있다. 이로부터 류체탄소성모형을 리용하여 양성자와 전자속을 여러가지 재료에 쪼일 때 발생하는 열리기파와 그것의 수송 및 재료의 파괴특성에 대한 연구들[2, 3]이 많이 진행되고있다.

우리는 3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자와 AI평판재료의 호상작용과정을 모의할 때 열호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위한 방도를 제기하고 몇가지 열 및 력학적특성에 대하여 연구하였다.

1. 고에너지양성자속의 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 ($\rho \leq \rho_0$)

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

여기서 c_0 과 λ_0 은 열리기파의 속도 D 와 립자의 속도 u 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 열러기과의 발생구역 즉 대전립자와 재료물질내부에 존재하는 전자들과의 호상작용구역을 확정하는것이다.

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

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

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

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

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 Al속에서 침투깊이에 따르는 $\rho_{\text{최대}}$ 의 변화는 그림 1과 같다.

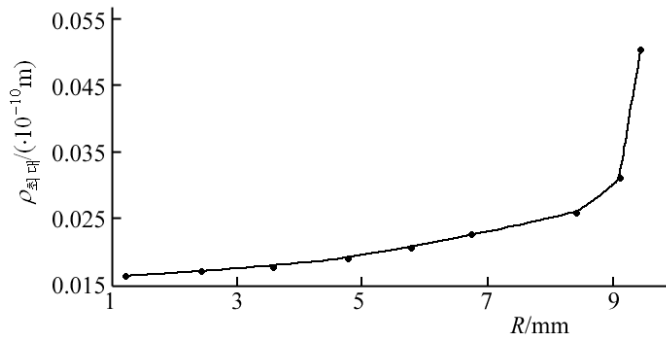


그림 1. 침투깊이에 따르는 $\rho_{\text{최대}}$ 의 변화

그림 1에서 보는바와 같이 $\rho_{\text{최대}}$ 는 침투깊이가 깊어짐에 따라 초기에는 큰 변화가 없지만 일정한 깊이이상에서는 에네르기가 작아지면서 급격히 커진다. 이것은 대전립자의 속도가 떨어지면서 표적거리가 급격히 커지며 이와 함께 표적물질속에서 열발생구역이 급격히 커진다는것을 의미한다.

2. 50MeV 양성자쫓임에 의한 Al재료의 열력학적특성변화

재료의 표면이 자리표면에 평행인 무한히 작은 평행6면체로 되어있으며 그것의 온도가 일정하고 요소체적이 자유로이 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 길이팽창결수이고 c 는 체적팽창결수이다.

물체의 완전변형성분과 탄성응력성분을 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.

$$\epsilon''_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \epsilon''_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad \epsilon''_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma''_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}, \quad \gamma''_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}, \quad \gamma''_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx} \quad (4)$$

완전변형성분과 변위성분 u, v, w 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

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

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

온도 T 가 주어지고 초기조건과 경계조건이 주어진 경우 열탄성방정식을 풀어 변위와 응력을 구할수 있지만 해석적인 풀이를 구할수 있는 경우는 많지 않으므로 우리는 3차원 설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자와 Al평판재료의 호상작용과정을 모의할 때 열 호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위한 방도를 제기하고 몇가지 열 및 력학적특성에 대하여 연구하였다.

양성자와 Al평판재료의 열호상작용반경과 호상작용시간의 제한을 극복하기 위하여 우리는 통과시간이 같고 양성자의 속도변화가 그리 심하지 않도록 양성자주행구간을 적당한 구간으로 분할하고 개별적인 구간에서 발생한 열이 재료의 탄성특성을 변화시킨다고 가정하여 모의기하를 그림 2와 같이 작성하였다.

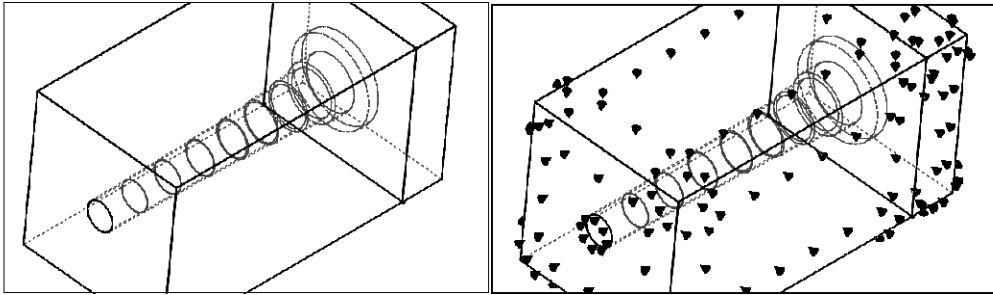


그림 2. 양성자와 Al평판재료의 열호상작용모의기하

양성자와 Al평판재료의 열호상작용모의파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 양성자와 Al평판재료의 열호상작용모의특성

파라메터	E/MeV									
	50	48	44	40	35	30	25	19	13	5
$\Delta E/\text{MeV}$	0	4	4	4.5	5	5	5.5	6	7	9
$\Delta R/\text{mm}$	0	1.24	1.18	1.17	1.16	1.03	0.97	0.83	0.68	0.34
$V/(\cdot 10^7 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.78	9.38	9.18	8.7	8.24	7.58	6.92	6.03	4.91	3
$\Delta t/(\cdot 10^{-10} \text{s})$	0	0.132	0.126	0.134	0.143	0.135	0.14	0.137	0.136	0.12
$\rho/(\cdot 10^{-10} \text{m})$		0.016 3	0.017 0	0.017 8	0.017 9	0.020 6	0.022 5	0.025 8	0.031 2	0.050 4
P/W		0.047 8	0.047 8	0.053 7	0.059 7	0.059 7	0.065 7	0.071 6	0.083 6	0.107 5

재료의 력학적파괴를 특징짓는 최대당김응력 27.5MPa를 파괴판정조건으로 설정하였으며 이때 호상작용과정의 모의파라미터들은 표 2와 같다.

표 2. 양성자와 Al평판재료의 호상작용과정모의파라미터

파라미터	값	파라미터	값
모형 유형	선형, 등방성, 탄성	확충비	0.33
항복응력/(N·m ⁻²)	2.757 42 · 10 ⁷	질량밀도/(kg·m ⁻³)	2 700
인장응력/(N·m ⁻²)	6.893 56 · 10 ⁷	절단결수/(N·m ⁻²)	2.7 · 10 ¹⁰
탄성결수/(N·m ⁻²)	6.9 · 10 ¹⁰	열팽창률/K ⁻¹	2.4 · 10 ⁻⁵

3차원설계 및 모의프로그램 SolidWorks로 양성자($E_p=50\text{MeV}$)조임에 의한 Al평판재료의 열 및 력학적특성변화를 모의한 결과는 다음과 같다.

정상상태에서 양성자조임에 의한 Al재료의 열분포는 그림 3과 같다.

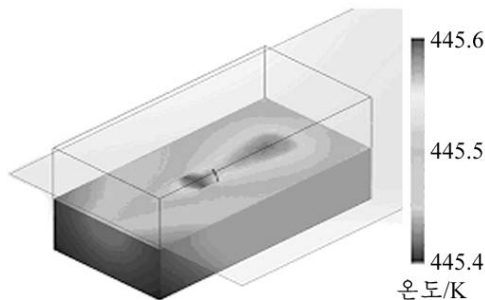


그림 3. 양성자조임에 의한 Al재료의 열분포

그림 3에서 보는바와 같이 중심부와 양성자의 루적부위에서 온도가 445.6°C로서 가장 높고 양성자입사면에서 온도가 445.4°C로서 가장 낮다.

비정상상태에서 양성자조임한 Al재료의 응력분포는 그림 4, 5와 같다.

그림 4, 5에서 보는바와 같이 양성자입사면과 양성자루적부위에서 응력은 항복응력(27.5MPa)의 수십배에 달하는 1 181MPa로서 재료의 물리적손상을 가져온다.

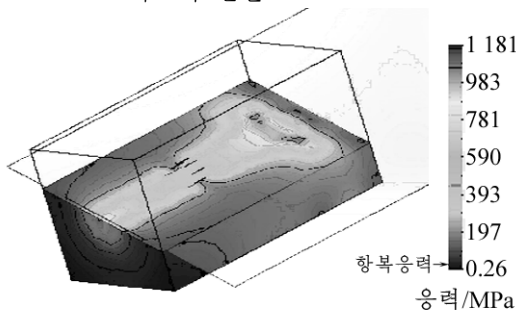


그림 4. 양성자조임한 Al재료의 응력분포 (경사면)

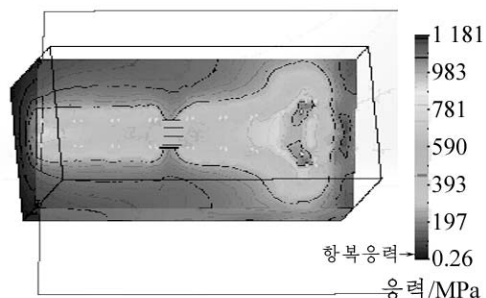


그림 5. 양성자조임한 Al재료의 응력분포 (정면)

비정상상태에서 양성자조임한 Al재료의 변위분포는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보는바와 같이 변위가 가장 심하게 나타난 곳은 재료의 모서리부위로서 이때 변위는 0.98 μm 였다.

다음으로 비정상상태에서 양성자조임한 Al재료의 변형분포는 그림 7과 같다.

그림 7에서 보는바와 같이 변형이 가장 심하게 나타난 곳은 양성자의 입사면부위와 양성자의 루적부위로서 이때 최대변형률은

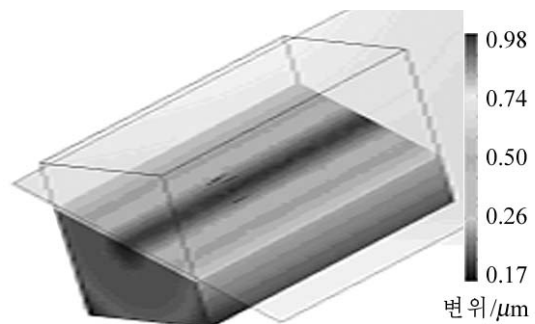


그림 6. 양성자조임한 Al재료의 변위분포

$2.18 \cdot 10^{-2}$ 이었다.

비정상상태에서 양성자조임한 Al재료의 변형방향분포는 그림 8과 같다.

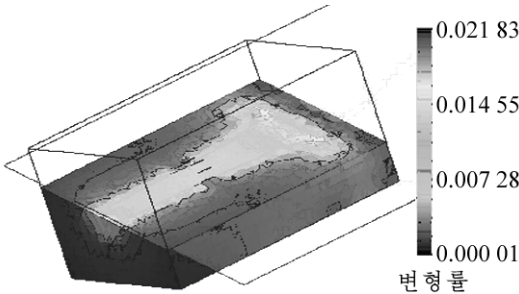


그림 7. 양성자조임한 Al재료의 변형분포

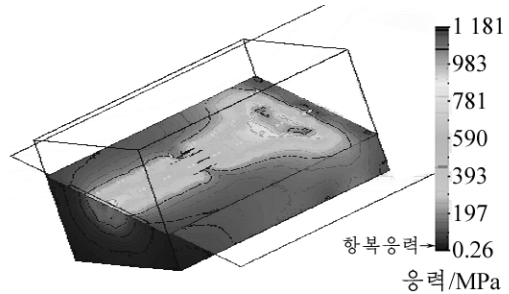


그림 8. 양성자조임한 Al재료의 변형방향분포

그림 8에서 보는바와 같이 양성자조임한 Al재료의 변형방향은 양성자의 입사방향과 수직으로 향하였다.

모의결과로부터 우리는 Al재료의 양성자속에 의한 파괴에너지를 $g(\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 를 다음의 식으로 결정하였다.

$$g = \frac{E}{s \cdot \Delta t} = \frac{E}{\pi \rho^2 \Delta t} = \frac{0.59}{3.14 \times (4.45 \times 10^{-2})^2 \times 1} = 95.1$$

계산결과는 선행연구결과[3]와 잘 일치한다.

맺 는 말

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

2) 3차원설계 및 역학모의프로그램 SolidWorks로 양성자($E_p=50\text{MeV}$)조임한 Al재료의 열 및 역학적특성변화를 모의하고 재료의 파괴에너지를 결정하였으며 이것은 선행연구결과와 잘 일치하였다.

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.

주체104(2015)년 10월 5일 원고접수

Thermodynamic Characteristics Change of Al Material by 50MeV Positron Irradiation

Chae Chol, Choe Myong Sin and Kim 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 Al material by positron ($E_p=50\text{MeV}$) irradiation with 3D design and mechanics simulation program SolidWorks.

And we determined the breakdown energy of material to simulate the thermal and dynamic characteristics change of Al material by positron ($E_p=50\text{MeV}$) irradiation with SolidWorks and verified its correctness.

Key words: positron irradiation, thermodynamic characteristics, Al