

하나로 냉중성자원의 핵설계

조영식, 장종화, 최창웅

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에 설치할 냉중성자원은 물리, 화학 및 재료과학 분야에 폭넓게 활용되는 기반 장치이며 4 Å 이상의 중성자 파장에서 높은 중성자속을 얻기 위해서는 감속재의 선택이 중요하다. 이 보고에서는 감속재로 액체 수소와 액체 중수소를 사용하는 경우를 비교하였다. 계산은 몬테카를로 코드인 MCNP를 이용하고 액체 수소와 액체 중수소에 대한 산란법칙을 적용했다. Semi-analytic 방법과 MCNP 해석을 통해 중성자온도와 이득을 계산하였으며 전체적으로는 Semi-analytic 방법과 MCNP 해석이 근접함을 확인하였다.

1. 서 론

물리, 화학 및 재료과학 분야에 폭넓게 활용되고 있는 냉중성자원의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 냉중성자 감속재의 선택이다. 저에너지, 장파장의 중성자 밀도를 늘리면서 발열량을 최소화하는 것이 중요하다. 냉중성자 감속재로는 액체 수소와 액체 중수소가 많이 사용되고 있다.

본 보고에서는 Monte Carlo Particle Transport Code인 MCNP를 이용하여 하나로 내의 냉중성자원에서 발생하는 냉중성자의 온도와 이득을 계산하였다. 냉중성자를 얻기 위한 감속재로는 액체 수소와 액체 중수소를 사용하였으며 각각을 사용하였을 때의 중성자 온도와 이득을 비교하였다. 또한 액체 수소와 액체 중수소를 적정 비율로 혼합하였을 때의 이득도 함께 계산하였다.

냉중성자원에 사용하는 액체 수소는 질량이 작고, 산란 단면적이 크고, 기화 온도가 낮으므로 원자로내의 중성자를 저온상태로 감속시키기에 좋다. 그러나 수소는 흡수 단면적이 다소 크므로 대용량의 냉중성자원으로 사용하기에는 약간 미흡하다. 액체 중수소는 흡수 단면적과 산란 단면적의 비가 매우 작으므로 대용량의 냉중성자원 감속재로 사용하는 데는 액체 수소보다 적합하다. 그러나 하나의 경우처럼 용적이 제한된 경우에는 액체 수소의 감속성과 액체 중수소의 저 흡수성을 잘 조합하여 최적의 수소 중수소비로 혼합하는 것이 좋을 것이다.

수소분자는 2 개의 양성자와 2 개의 전자로 구성되어 있으며 스핀 1/2인 양성자가 서로 반대

방향으로 결합한 경우를 para-hydrogen, 반대인 경우를 ortho-hydrogen이라 한다. 상온 이상의 온도에서는 25 %의 para-hydrogen과 75 %의 ortho-hydrogen으로 구성되나, para-hydrogen이 더 낮은 에너지상태에 있기 때문에 냉각과정에서 70 % 이상의 ortho-hydrogen은 비등하므로 온도에 따라 ortho와 para의 구성비는 바뀌며 액체 상태인 20.4 K에서는 99.8 %가 para-hydrogen으로 된다.[1] 중수소의 경우에는 ortho-deuterium이 더 낮은 에너지상태이므로 액화상태에서는 98 %가 ortho-deuterium이 된다. 저온에서 수소와 중수소분자는 para- 또는 ortho- 분자가 지배적으로 많아지므로 스핀이 임의로 분포되어 있다고 가정하기 곤란하다. 따라서 두 개 원자간의 스핀을 고려한 단면적이 분자의 유효 단면적이 된다.[2] 60 meV 이하의 중성자에너지에서 이 효과는 크게 차이를 보이며 수소분자의 경우에는 에너지가 낮아질수록 ortho-hydrogen의 단면적이 1meV에서 100 barn 정도로 증가하는데 para-hydrogen은 0.7 barn 이하로 작아진다. 중수소분자의 경우에는 수 meV에서 감소하여 1 meV 이하에서는 ortho-hydrogen은 약 3 barn, para-deuterium은 약 2 barn 정도가 된다.

냉중성자를 내부의 감속재 배치는 냉중성자공(CNS) 근처의 중성자속의 에너지분포를 크게 변화시키지 않는다고 가정하여 노심의 임계문제를 계산하여 냉중성자공에서 적절히 떨어진 곳의 표면 중성자원을 구하고 이 표면 중성자원으로부터 냉중성자공으로 입사되는 중성자에 대한 수송계산을 수행하였다. 냉중성자공 근처의 중수 감속재에서의 열중성자의 평균 자유행정은 3.4 cm 정도이므로 냉중성자공의 반경이 8 cm일 때 표면 선원을 15 cm 반경인 곳에 위치하면 약 2 평균 자유행정거리이므로 노심 부분과 냉중성자공의 간섭이 적다고 볼 수 있다. 이 경우 중성자 수송계산을 분리하여 실시할 수 있다.[3]

낮은 에너지에서의 단면적을 정확하게 취급하기 위해 Scattering law에 의거한 중성자 감속계산 방법을 채택하였으며 MCNP4A[4]를 계산 도구로 사용하였다. 이 계산에 사용한 Scattering law는 ENDF/B-VI release 2 [5]의 파일이다.

냉중성자 계산을 위해서는 냉중성자공이 내반경 100 cm이고 두께 2 cm의 강철원통 내부에 있는 것으로 모사하였다. 냉중성자 감속장치는 높이 17 cm이며 내반경 6.5 cm, 두께 2 mm인 알루미늄원통으로 모사하였다. 감속재인 액체 수소와 중수소의 밀도는 20 °K에서의 값인 0.071 g/cc와 0.170 g/cc를 각각 사용했다.

2. 중성자 온도 계산

하나로의 감속재 온도인 실온에서의 열중성자속은 22.3 meV에서 최대값을 갖는 Maxwell-Boltzman 분포를 가진다. 이 중성자분포는 감속재의 온도가 낮아지면 열적 평형을 달성하기 위해 중성자의 온도도 낮아진다.

열적 평형 상태에서 중성자속은 Maxwell-Boltzman 분포를 이루게 된다. 중성자 온도가 T일 때 수밀도의 에너지분포는 Maxwell 분포식이며 다음과 같다.[6,7]

$$N(E)dE = \frac{2\pi n}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E} e^{-E/kT} dE,$$

여기서, $n = \int_0^{\infty} N(E)dE$ 이다.

중성자속은 속도와 수밀도의 곱이므로,

$$\phi(E) = \frac{2\pi n}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{\frac{2}{m}} E e^{-E/kT}$$

여기서 m 은 중성자의 질량이다.

중성자속의 최대치는 $E_{th} = kT$ 에서 나타난다.

$$\phi_{th} = n \frac{2}{e\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2}{mkT}}$$

중성자속의 적분량은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_0^{\infty} \phi(E) dE = n \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2kT}{m}} = n \bar{v},$$

여기서 유효중성자 속도 $\bar{v} = \sqrt{8kT/\pi m}$ 이다.

따라서 중성자 온도는 중성자속의 적분과 최대치의 비로 표현할 수 있다.

$$kT = \int_0^{\infty} \phi(E) dE / e\phi_{th}$$

MCNP로 계산한 열영역의 중성자속분포는 Maxwell 형태를 보이나 최대치 근처에서 구배가 0 이 되므로 정밀한 최대 온도를 알기 어렵다. 따라서 중성자밀도의 적분에서 n 을 구하고, 중성자속의 적분치를 구하여 위 식에서 T (또는 v_{th})를 구하는 방법이 바람직하다.

실제 상황에서는 모든 에너지구간에서 Maxwell 분포를 보이지는 않기 때문에 열중성자 최대치 근처에서 하한에너지와 상한에너지를 설정하여 적분한다.

$$\begin{aligned} \int_{E_1}^{E_2} \phi(E) dE &= \frac{2n}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \left[e^{-\frac{E_1}{kT}} \left(1 + \frac{E_1}{kT}\right) - e^{-\frac{E_2}{kT}} \left(1 + \frac{E_2}{kT}\right) \right] \\ &= kT\phi_{th} e \left[e^{-\frac{E_1}{kT}} \left(1 + \frac{E_1}{kT}\right) - e^{-\frac{E_2}{kT}} \left(1 + \frac{E_2}{kT}\right) \right] \end{aligned}$$

위 식은 비선형대수방정식이며, 온도 kT 는 반복법에 의해 쉽게 구할 수 있다.

$$kT = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \phi(E) dE}{\phi_{th} \frac{1}{e \left[e^{-\frac{E_1}{kT}} \left(1 + \frac{E_1}{kT}\right) - e^{-\frac{E_2}{kT}} \left(1 + \frac{E_2}{kT}\right) \right]}}$$

상온의 중수 감속재를 사용한 경우, MCNP 계산결과에서 Maxwell 분포를 비교적 잘 만족하는 구간은 0.0001 ~ 0.1 eV 구간이고 이 구간에서의 flux의 합은 5.69E14이며 최대값은 8.90E15이다. 따라서 위 식에서 초기 온도를 320 °K로 가정하고 중성자온도를 구하면 306 °K가 된다. 이때의 중성자밀도 n 을 구하면 2.49E9을 얻을 수 있다. 동일한 계산으로 para-hydrogen의 경우에는 중성자온도 62 °K, 중성자밀도 2.90E9, ortho-deuterium의 경우에는 중성자온도 87 °K, 중성자밀도 4.16E9 를 얻을 수 있었다.

3. 중성자 이득

냉중성자원은 원자로 감속재 중의 장파장의 중성자를 다량 획득하기 위한 장치이므로 정상온

도의 적절한 감속제인 중수(D₂O)를 냉중성자원으로 사용했을 때보다 몇 배로 많은 중성자를 얻게 되는가를 냉중성자원의 특성(figure of merit)으로 삼을 수 있다.[8] 즉, 하나로의 수직 CNS hole 을 모두 중수로 채운 경우의 중성자속 $\phi_0(E)$ 를 기준으로 냉중성자원을 설치한 후의 이득(Gain) 은 다음 식으로 표현한다.

$$G(E) = \frac{\phi(E)}{\phi_0(E)} .$$

냉중성자의 에너지범위는 일반적으로 De Broglie 파장의 단위로 표현된다.[9]

$$\lambda \text{ (in } \text{\AA}) = \frac{9.04}{\sqrt{E \text{ (in meV)}}}$$

따라서 2200 m/sec (25.3 meV)에서의 파장은 1.8 Å이며 냉중성자의 에너지 범위인 10 Å에 해당하는 에너지는 0.8 meV 이다.

에너지분포가 Maxwell 분포에 가까운 열영역에서의 이득은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} G(E) &= \frac{\frac{2\pi n}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{\frac{2}{m}} E e^{-E/kT}}{\frac{2\pi n^0}{(\pi kT^0)^{3/2}} \sqrt{\frac{2}{m}} E e^{-E/kT^0}} , \\ &= \frac{n}{n^0} \left(\frac{T^0}{T}\right)^{3/2} e^{-E\left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT^0}\right)} \end{aligned}$$

극저온에서의 중성자 이득은 아래 식처럼 중성자온도의 3/2승에 비례한다.

$$G(\lambda = \infty) = \frac{n}{n^0} \left(\frac{T^0}{T}\right)^{3/2} .$$

만일, 중성자의 손실이 없는 무한매질이라면 상온 중수의 온도 T^0 가 300 °K 라면, 액체 수소의 온도 T 가 20 °K이므로 이론상의 최대이득은 58이 된다. 표 1은 MCNP를 사용하여 계산한 중성자 이득을 보여준다.

표 1. 감속제에 따른 중성자 이득

감속제	5Å (3meV)	10Å (0.8meV)	13Å (0.5meV)	17Å (0.3meV)	23Å (0.15meV)
D2O	(2.48E15)	(5.80E14)	(3.20E14)	(2.01E14)	(8.00E13)
para-H2	7.39 (1.84E16)	15.88 (9.21E15)	25.00 (7.99E15)	23.34 (4.70E15)	23.83 (1.91E15)
ortho-D2	8.10 (2.01E16)	26.41 (1.53E16)	22.12 (7.08E15)	17.70 (3.56E15)	17.59 (1.41E15)
para-H2(20%)+ ortho-D2(80%)	5.47 (1.36E16)	15.04 (8.72E15)	13.96 (4.47E15)	12.11 (2.44E15)	13.06 (1.04E15)
para-H2(40%)+ ortho-D2(60%)	6.39 (1.59E16)	17.35 (1.01E16)	18.78 (6.01E15)	17.37 (3.50E15)	17.60 (1.41E15)
para-H2(60%)+ ortho-D2(40%)	6.94 (1.72E16)	17.69 (1.03E16)	21.24 (6.79E15)	20.10 (4.05E15)	20.03 (1.60E15)
para-H2(80%)+ ortho-D2(20%)	6.95 (1.73E16)	16.61 (9.63E15)	23.25 (7.43E15)	22.57 (4.54E15)	21.73 (1.74E15)

표에서 괄호 안의 숫자는 중성자속을 의미한다. MCNP 계산결과를 보면 10 Å이하의 경우에는 액체 중수소의 이득이 크고 13 Å 이상의 경우 액체 수소의 이득이 크다는 것을 알 수 있다. 파장에 따라서는 13 Å에서의 이득이 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Semi-analytic 추정과 비교하면 전체적 경향은 같으나 부분적으로는 다른 결과를 보이고 있다.

4. 결론

냉중성자원을 얻기 위한 감속재로 액체 수소와 액체 중수소를 사용하였을 때의 중성자온도와 이득을 계산하여 비교하였다. 중성자온도 액체 수소에서 62 °K, 액체 중수소에서 87 °K로 매질의 온도인 20 °K와 비교할 때 액체 수소의 경우 냉각효과가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 중성자이득은 10 Å이하의 경우에는 액체 중수소가 더 크고 13 Å 이상의 경우 액체 수소가 더 크다는 것을 알 수 있다. 파장에 따른 경향이 Semi-analytic 추정과 전체적으로는 일치하나 부분적으로는 다른 부분에 대해서는 더 자세한 규명이 필요하다.

참고문헌

1. T.M. Flynn, "Cryogenic Engineering," Marcel Dekker, Inc., 1997.
2. J.A. Young and J.U.Koppel, Phys. Rev. 135, A603, 1964.
3. J.B.Lee et al., "Radiation Streaming Analysis in the Radial and Tangential Beam Tubes of a TRIGA Research Reactor Using MCNP and Comparison with Measurement," Nucl. Sci. and Eng. 121, 334, 1995.
4. J.F.Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A," LA-12625-M, 1993.
5. R.E. MacFarlane, "New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2," 1994.
6. G.I.Bell and S.Glasstone, "Nuclear Reactor Theory," Van Nostrand Reinhold, 1970.
7. J.J.Duerstadt and L.J.Hamilton, "Nuclear Reactor Analysis," John Wiley and Sons, 1976.
8. P. Ageron et al., "Experimental and Theoretical Study of Cold Neutron Sources of Liquid Hydrogen and Liquid Deuterium," Cryogenics, 1969.
9. W.E.Meyerhof, "Elements of Nuclear Physics," McGraw-Hill, 1989.