

하나로 냉중성자원 감속재 특성 분석

The Characteristic Study of HANARO Cold Neutron Moderator

유영진, 최정운, 이기홍, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구용 원자로인 하나로에 냉중성자원을 설치하는 과제가 현재 개념 설계 중이다. 하나로에 설치될 냉중성자원 시설은 반사체에 약 20K 온도를 가지는 액체 수소를 감속재로 사용하는 감속재 용기를 설치하여 반사체의 열중성자를 5 meV이하의 저에너지를 갖는 냉중성자로 감속시키는 장치이다. 기존 연구 결과인 단상의 para 수소로 설계된 감속재 용기의 모델을 이용하여 감속재로 사용되는 수소의 para/ortho 비와 void fraction과 같은 수소의 물성 변화에 대한 특성 분석을 수행하였다. 냉중성자원 정상 운전 시 para/ortho 비의 범위를 선정하였으며 열유동 해석에 앞서 void fraction의 허용 한도를 정하고자 하였다. 이와 같은 냉중성자원의 감속재 용기의 핵공학적 특성을 분석하기 위하여 coupled MCNP 모델을 이용하였다.

Abstract

The conceptual design of the HANARO CNRF (Cold Neutron Research Facility) project is in progress. It is desirable to construct a cold neutron source for increasing the cold neutron flux with the liquid hydrogen at around 20K. The parametric evaluations on the para/ortho hydrogen ratio and void fraction were performed with the previous analyses of the moderator cell model, the single phase para hydrogen. Through this study, calculated were operation margin of the para/ortho ratio and the void fraction. The analysis for the characteristics of the cold neutron moderator was performed using the couple MCNP model.

1. 서 론

냉중성자원은 노내에서 생성된 열중성자를 20K의 극저온의 감속재로 감속시켜 중성자의 에너지가 5 meV 이하인 냉중성자로 만들어주는 장치이다. 냉중성자 시설은 냉중성자와 물질과의 상호 작용에 의한 산란/회절 현상을 이용하여 재료의 물성을 연구하는 기반 시설로서 NT, BT등에 필수적인 핵심 기반 연구 시설이 될 것으로 예상된다. 이러한 냉중성자 시설을 연구용 원자로인 하나로에 설치하기 위한 과제가 수행 중이며 극저온의 감속재를 담은 감속재 용기는 내부 실린더에 기화된 수소가 채워지며 외부 실린더에는 액체 수소가 순환하는 이중 실린더 구조로 설계가 진행 중 이다 (그림 1).¹⁾ 단상 유동이며 액체 수소는 para 상태로만 이루어졌다는 가정 하에 선정된 이중 실린더 구조는 반경 방향으로 2 cm 두께, Z축 높이 방향으로 3 cm 두께를 갖는 형태이다.

본 논문에서는 단상의 para 수소로 설계된 이중 실린더형의 감속재 용기에서 액체 수소의 물성 변화에 대한 영향 평가를 통하여 설계 목표에 부합하는 운전 범위를 정하고자 하였다. 냉중성자 감속재 용기의 설계 목표는 최대 냉중성자속을 얻으면서 동시에 감속재와 감속재 용기를 통해 발생하는 발열량을 최소화하는 것 뿐 만아니라 각각의 산란장치가 요구하는 냉중성자 파장을 고려하여 2~12 Å구간의 냉중성자속을 최대화 하는데 목적이 있다(표1 참조). 그 외에도 냉중성자원은 가동 시와 운전 정지 시에 상온에서 극저온까지의 급격한 온도 변화 구간이 존재하게 되므로 기계적인 건전성도 중요한 요건이 되며 용이한 제작성 또한 설계의 목표이다.

본 논문은 계산 시간을 줄이며 MCNP 계산상의 통계적 오차를 줄이기 위하여 개발한 기존 연구 결과인 Coupled MCNP 모델^{2,3)}을 이용하여 하나의 냉중성자 수직공과 감속재 용기를 모사하며 계산하였다.

2. Para/Ortho 수소 비율에 따른 특성 분석

극저온 감속재로 사용되는 액체 수소는 2개의 양성자와 2개의 전자가 결합되어있는데 양성자의 스핀 방향에 따라 para 수소, ortho 수소로 나누어진다. 스핀 방향이 서로 반대 방향으로 결합하였을 때 para 수소라 하며 같은 방향으로 결합한 경우는 ortho 수소라 한다. 상온에서 수소는 25%의 para 수소와 75%의 ortho 수소로 이루어지며 온도에 따라 그 비율이 바뀌는 특성을 가지고 있다. para 수소가 에너지상태로는 ortho 수소보다 낮은 에너지 상태이므로 20K의 온도에서 평형 상태인 수소는 99.8%가 para 수소로 이루어져 있다. 하지만 ortho 수소에서 para 수소로 변환하는 과정이 catalyst converter를 사용하지 않고서는 매우 느리게 일어나게 되며 catalyst converter를 사용하지 않고 ortho 수소에서 para 수소로 변환을 하는 비율은 다음 식과 같다.

$$\frac{dx_o}{dt} = -C_2 x_o^2$$

이 식에서 C_2 는 변환율을 나타내는 상수이며 normal boiling point에서 0.0114hr^{-1} 의 값을 갖는다. 만약, 냉중성자원을 정지 후 재가동 시 24시간 정도의 대기 시간을 갖는다고 가정하면 위의 식에 의하여 냉중성자원을 채우고 있는 감속재는 37.77% para-62.23% ortho 수소로 채워지게 될 것이다.^{4),5)} 하지만, 방사선장에서 반사선 조사에 의하여 para 수소가 ortho 수소로 전환한다는 연구 결과를 고려하면 반사체내에서 para/ortho 수소의 비를 예측하기 힘들다.⁶⁾ 또한, 냉중성자원을 가동하는 동안 감속재의 para/ortho 비율을 정확히 측정할 수가 없으며 표 2에 조사한 바와 같이 외국의 경우 대부분 50~65% 정도의 ortho로 구성비가 이루어진 것으로 가정하고 있다.^{7),8)}

그럼에도 불구하고, 액체 수소의 para/ortho 비율이 중요한 이유는 para 수소와 ortho 수소가 그림 2에 나타낸 바와 같이 냉중성자 영역으로 내려갈수록 비탄성 산란 단면적에서 한 차수 이상의 차이를 보인다. 5meV에서 para 수소는 약 1.5 barn 정도인데 반하여 ortho 수소는 약 50 barn 정도이며 에너지가 낮아질수록 그 차이는 더 커짐을 볼 수 있다.

현재 para 수소로 가정을 하고 설계하여 반경 방향 2 cm, Z축 방향 3 cm의 두께를 가지는 이중 실린더형 감속재 용기에 para/ortho 수소의 비율을 변경하며 냉중성자속의 변화를 계산하였으며 그 결과를 그림 3과 표 3에 정리하였다. 100% para 수소로 감속재를 사용한 경우보다 80% para-20% ortho 수소의 혼합이 6.7%정도 냉중성자속이 높음을 알 수 있다. 또한, 그림 4에 파장별로 나타낸 스펙트럼에서 각각의 구간별로 살펴보면 80% para-20% ortho 수소의 경우는 11.6~12.7Å에서 para 100% 수소에 비하여 26%정도 냉중성자속이 높게 나타났으며 3.4~4.02Å 구간을 제외하고는 냉중성자속의 강도가 para 100% 보다 높음을 알 수 있다. 40% para-60% ortho 수소의 경우는 2~3.4Å에서는 para 100% 보다 냉중성자속이 낮지만 그 외의 영역에서는 para 100% 보다 냉중성자속이 높으며 최대 18% 정도 높은 것을 알 수 있다.

추후, 하나로 냉중성자원은 가동 중 para/ortho 수소의 비율이 외국 사례와 같이 60% 정도의 ortho로 이루어진다고 가정하면 그림 4에 나타낸 바와 같이 산란 장치가 요구하는 파장의 냉중성자속 강도가 para 100% 보다 높음으로써 설계 목표에 더 부합함을 알 수 있다. 그럼으로, para 수소로 설계된 이중 실린더형 감속재 용기는 para/ortho 수소의 비율이 40% para-60% ortho 비율까지도 여유도가 있음을 확인하였다.

추가적으로 HFIR과 NBSR의 결과⁹⁾와 같이 하나로 냉중성자원도 감속재 용기의 크기에 따라 para/ortho 비율의 영향이 다를 것을 그림 5와 같이 확인함으로써 para/ortho의 비탄성 산란 단면적 차이 외에도 복합적인 영향으로 냉중성자속이 생산된다는 것을 알 수 있다. 또한, 비탄성 산란 단면적의 경우, 냉중성자 영역의 para와 ortho 각각의 비탄성 산란 단

면적도 중요하지만 냉중성자 혹은 열중성자의 up-scattering에 대한 영향도 있을 것으로 예상되며 추후 연구해야 할 것으로 생각된다.

3. Void Fraction 비율에 따른 특성 분석

하나로 냉중성자원은 이상의 액체 수소가 열사이펀회로를 통하여 자연 대류 방식으로 순환을 한다. 노내의 냉중성자원은 핵 발열량에 의하여 기포가 발생하게 되며 결국 감속재 내부에 기화되며 생성된 void fraction의 양이 늘어남에 따라 설계된 감속재의 두께를 줄이는 영향을 주게 된다. 본 계산을 통하여 void fraction의 영향을 평가하고 이상 유동을 허용하며 설계 요건을 만족하는 void fraction의 한도를 정하고자 하였다.

설계 중인 이중 실린더에 액체 수소의 밀도를 변경시키면서 void fraction을 모사하였으며 그 결과는 그림 6과 표 4에 정리하였다. 참고적으로 void fraction 100%는 냉중성자원 가동 정지 시 액체 수소를 냉각시켜주는 cold box의 냉각 용량을 줄여줌으로 인하여 감속재 용기 및 열사이펀 회로내에 있는 액체 수소가 모두 기화된 상태를 말하며 void fraction 0%라 함은 단상의 액체 수소를 말한다. 결과를 살펴보면, void가 늘어남에 따라 예상과 같이 냉중성자속이 감소하며 40%이상의 void fraction에서는 냉중성자속이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 20% void fraction 경우를 살펴보면 단상일 때와 비교하여 단지 3.2% 정도의 냉중성자속의 차이를 나타낸다. 또한, 그림 7의 파장별로 나타낸 void fraction의 영향을 보면 40% void fraction은 void 0%인 단상의 경우와 비교하여 산란장치가 요구하는 냉중성자 파장인 2~12 Å구간의 스펙트럼 상에서 11.6~12.7Å영역에서 최대 16% 정도 낮으며 전체적으로 뚜렷한 스펙트럼의 감소를 알 수 있지만 20% void fraction의 경우 2~12 Å구간의 스펙트럼 상에서 냉중성자속이 단상의 경우와 1~2% 정도의 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

추후 이상 유동에 대한 열유동해석과 mock-up 테스트를 통하여 확인해야 하지만 위의 결과와 설계 요건을 고려하여 판단할 때 이상 유동의 허용 void fraction은 20%이내로 해야 할 것으로 판단된다. 또한, 표 5를 참고하면 외국의 경우도 이와 유사한 결과를 얻었으며 그 결과를 기초로 약 20% 안팎의 void fraction을 허용한 것으로 생각된다.

4. 결론

하나로에 설치될 냉중성자원의 단상의 para 수소로 가정하여 설계된 냉중성자 감속재 용기의 모델을 이용하여 극저온 감속재인 액체 수소의 물성 변화에 대한 특성 분석을 하였다.

액체 수소는 결합된 양성자의 스핀 방향에 따라 para 수소와 ortho 수소로 나누어지는데 para/ortho 수소의 비가 40% para-60% ortho 까지도 100% para 수소로 설계된 결과

와 산란 장치가 요구하는 냉중성자 영역인 2~12 Å구간의 스펙트럼 상에서 큰 차이를 보이지 않으며 설계 목표에 부합하는 것을 확인할 수 있었다.

이상 유동에 의한 열사이편 방식을 사용하는 하나로 냉중성자원은 void fraction 변화에 대한 계산 결과, 설계 목표를 만족시키는 void fraction의 범위를 20% 이내로 하여야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

또한, 추후 요구되는 연구 방향으로는 para, ortho 수소의 비탄성 산란 단면적에 대한 연구로서 냉중성자 혹은 열중성자의 up-scattering에 대한 영향 평가가 필요한 것으로 생각된다.

5. 참고 문헌

- 1) 유영진, 이기홍, 서철교, 김영진. “하나로 냉중성자원 감속재 용기 개념 설계”, 하나로 워크샵, 2004.
- 2) “MCNP-4C: Monte Carlo N-Particle Transport Code System”, LANL. 2000
- 3) 유영진, 이기홍, 오수열, 서철교, 김영진, “하나로 냉중성자 감속기 개념 설계 연구”, 2003 추계 한국원자력공학회. 2003
- 4) Scott, R. B., Brickwedde, F. G., Urey, H. C., and Wahl, M. H. (1934), J. Chem. Phys. 2, p. 454.
- 5) Feng Shen, Luzheng Yuan. “Conceptual study of cold neutron source in China Advanced Research Reactor”, Physica B 311, 2002, p152~p157
- 6) J. W. Choi, K. H. Lee and Y. J. Kim, “The Ortho-Para Ratio Characteristic of Hydrogen as a Moderator”, HANARO Workshop 2004.
- 7) Nelms, L. W. and Carter, H. G. (1968), “Nuclear-Radiation-Induced Conversion of Para-hydrogen to Ortho-hydrogen” NASA Report FZK p351~p352
- 8) C.H. Lee, T.C.Guang, K.C.Lan, Y.K.Chan, C.H.Wang, and S.K.Chen. “Status of TRR- II cold neutron source”, IGORR-VIII, 2001, p 1~p 15
- 9) D.L Selby et al. “High Flux Isotope Reactor Cold Neutron Source Reference Design Concept”, Oak Ridge National Laboratory, USA, 1998

표 1. 산란 장치 요구 파장

Instruments	Wavelength [Å]
Backscattering	6~12
40M-SANS	> 4.0
DC-TOF	2~9
Spin Echo	> 4.0
TAS	2.4 ~6.1
40M-SANS	> 4.0
Bio-REF	4.07, 5.5
V-REF	4.75
12M-SANS	> 4.0

표 2. para/ortho 수소비율에 대한외국사례

	para/ortho 가동 중 또는 설계 예상 비율
CMRR	50/50 (설계)
NBSR	50%이상의 ortho (65%로설계)
TRR	65/35 (설계)

표 3. para/ortho 수소 비율에 따른 냉중성자속 변화

혼합 비율(%)	냉중성자속(~5meV)	냉중성자속 비율
Para 100	1.183E+13	1.000
Para 90- Ortho 10	1.244E+13	1.052
Para 80- Ortho 20	1.262E+13	1.067
Para 70- Ortho 30	1.260E+13	1.066
Para 60- Ortho 40	1.243E+13	1.051
Para 50- Ortho 50	1.223E+13	1.035
Para 40- Ortho 60	1.210E+13	1.023
Para 30- Ortho 70	1.193E+13	1.009
Para 20- Ortho 80	1.175E+13	0.994
Para 10- Ortho 90	1.158E+13	0.979
Ortho 100	1.142E+13	0.966

표 4. Void fraction 변화의 냉중성자속 영향

Void fraction (%)	냉중성자속(~5meV)	냉중성자속 비율
0	1.183E+13	1.000
10	1.166E+13	0.986
20	1.145E+13	0.968
30	1.115E+13	0.943
40	1.081E+13	0.914
50	1.034E+13	0.875
60	9.701E+12	0.820
70	8.936E+12	0.756
80	7.990E+12	0.676
90	6.741E+12	0.570
100	5.238E+12	0.443

표 5. 각국 Void fraction 사례

원자로	Void fraction
MBSR (NIST-USA)	20% 이하
JRR-3M (JAERI-Japan)	34%
WWR-M (PNPI-Russia)	18MW에서 15%
CARR (CIAE-China)	20%
TRR-II (INER-Taiwan)	상부 30~35%, 하부 20~25%

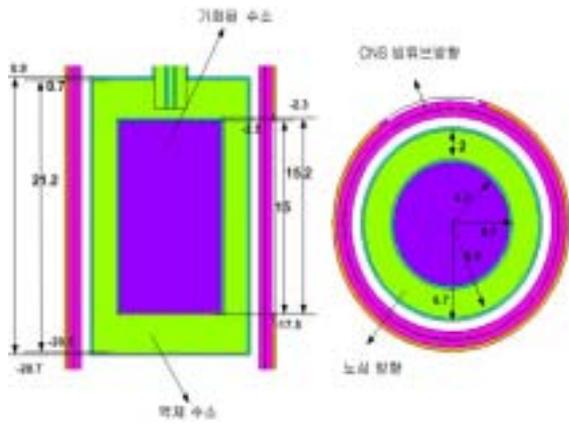


그림 1. 이중 실린더 크기와 치수

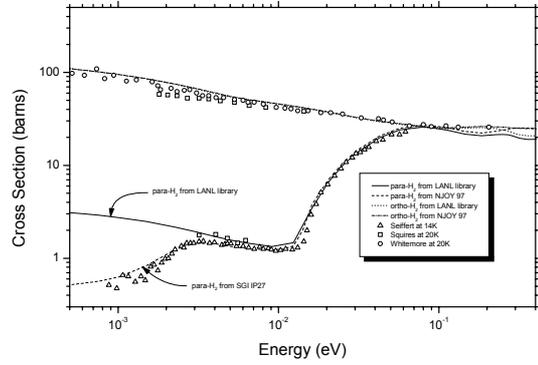


그림 2. 액체 수소의 inelastic scattering cross section

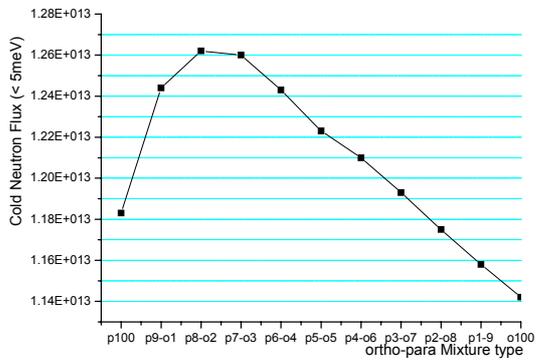


그림 3. para/ortho 수소 비율에 따른 냉중성자속 변화

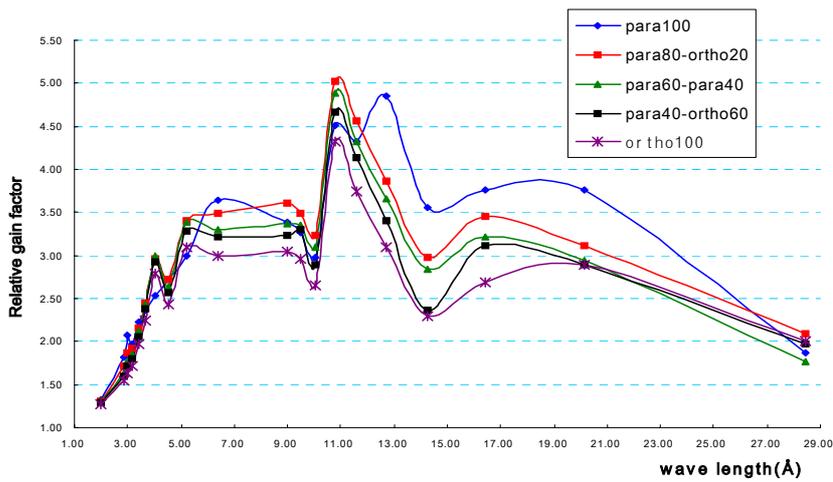


그림 4. para/ortho 수소 비율에 따른 냉중성자속 파장별 이득률비교

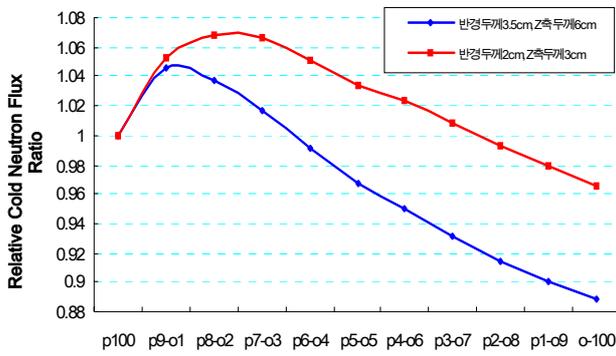


그림 5. 크기 변화에 따른 냉중성자 스펙트럼의 차이 비교

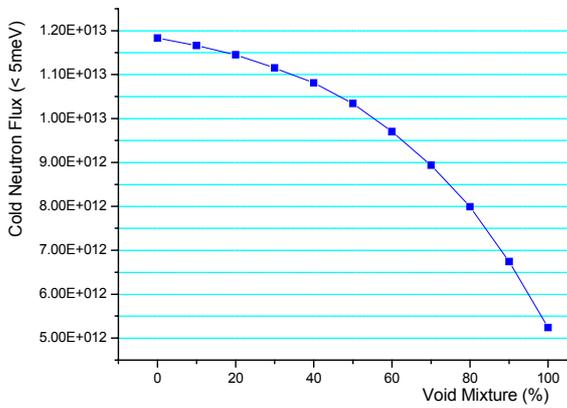


그림 6. Void fraction 변화의 영향

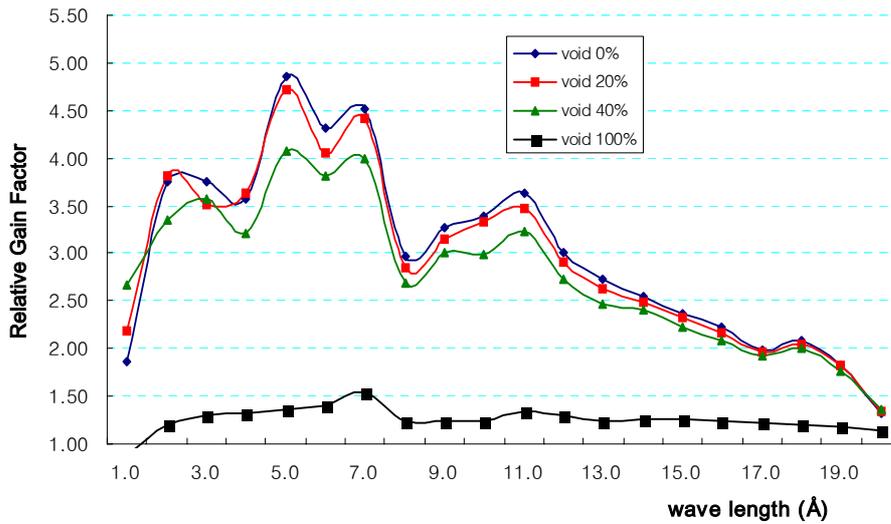


그림 7. Void fraction에 따른 냉중성자속 파장별 이득률비교