

하나로 냉중성자 감속기 개념 설계 연구

A Study for the Conceptual Design of HANARO Cold Neutron Moderator Cell

유영진, 이기홍, 오수열, 서철교, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에 설치될 냉중성자 감속기의 개념 설계를 위한 분석을 수행하였다. 현재 개념 설계가 진행되고 있는 냉중성자원은 감속재로서 액체 수소를 사용하는데 본 연구에서는 20K, 단상의 액체 para 수소로 가정하고 coupled MCNP 모델을 이용하여 계산을 하였다. 감속재 용기의 orientation, 두께, 형태 등을 변경하며 계산한 결과 높이 17cm, 내반경 6.5cm를 가지는 실린더형에 cavity를 준 cavity형 감속재 용기가 가장 냉중성자 이득률이 높다는 결론을 얻을 수 있었다.

Abstract

The analysis for the conceptual design of HANARO Cold Neutron Moderator Cell is performed using the MCNP code. Liquid para hydrogen in single phase at 20K is selected as a moderator. The calculation is performed by a coupled MCNP model. Parametric analyses on the orientation, thickness and type of the moderator cell have been done. The results show that cavity type moderator cell with the height of 17cm and the radius of 6.5cm gives the highest gain factor.

1. 서 론

하나로에 설치될 냉중성자원 시설은 노내에 약 20K 온도를 가지는 액체 수소를 감속재로 사용하는 감속재 용기를 설치하여 반사체의 열중성자를 5meV이하의 저에너지를 갖는

냉중성자로 감속시키는 장치이다. 냉중성자원에 사용하는 감속재로는 액체 수소와 액체 중수소등이 사용되고 있다. 외국의 경우는 HFR, FRM-2, RRR, KUR등이 액체 중수소를 감속재로 사용하고 있으며 NBSR, HFBR, Orphee, FRJ-2, KFKI, DR-3, DIDO, HFIR, JRR-3M에서 액체 수소를 감속재로 사용하고 있다. 열사이펀에 의한 감속재의 유동은 단상과 이상으로 분류할 수 있다. 단상의 경우는 열교환기의 입구와 출구 사이의 밀도차에 의한 추진력으로 순환하게 되며 원자로 수조내 기기의 배치가 단순하며 간단한 장점이 있다. 이상 유동의 경우는 액체와 기체간의 밀도차에 의하여 순환하므로 추진력이 크고 작동 온도의 이상 변동 시 self-regulation 기능을 통한 운전이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 하나로의 냉중성자 수직공에 설치할 냉중성자원의 감속재와 감속기 형태에 대한 개념 설계를 수행하였다. 냉중성자 수직공의 직경은 16cm이며 수직공 내부는 경수가 채워져 있었으나 현재는 반사체에서의 열중성자속을 높이기 위하여 Al plug를 설치해 놓은 상태이다. 냉중성자원의 극저온 감속재 종류와 감속재 용기의 형태에 따라서 냉중성자를 얻는 이득의 비가 크게 변하는데 본 논문에서는 감속재는 단상의 액체 para 수소를 이용하여 계산함으로써 형태의 변경에 대한 기본적인 개념을 수립하는데 목표를 두었다.

2. 냉중성자 계산을 위한 MCNP 라이브러리

수소 분자는 2개의 양성자와 2개의 전자가 결합되어있으며 스핀 1/2인 양성자가 서로 반대 방향으로 결합한 경우를 para-H₂, 반대의 경우를 ortho-H₂라 한다. 저온에서 수소 분자는 para분자가 지배적으로 많아지며 99.8%가 para 수소가 된다.

하나로에 설치될 냉중성자원은 20K의 액체 수소이므로 본 계산에서는 감속재 용기 안에 모두 para 수소가 단상으로 채워져 있다고 가정하였으며 계산에 사용한 라이브러리는 그림 1에 삽입하였다.

MCNP-4에 포함된 기본 라이브러리와 1994년에 배포된 Macfarlane 라이브러리 그리고 1995년 배포된 ENDF/B-VI.2 compound는 20K 이하의 액체 수소와 액체 중수소의 냉중성자 영역에 대한 계산 결과의 신뢰성이 취약한 것으로 판단됨에 따라 새로운 라이브러리 사용을 모색하였다. 1999년 KAERI의 핵자료 평가랩에서 ENDF/B-VI.3를 source로 사용하고 64 bit 전산기인 SGI IP27에서 NJOY97.45의 LEAPR모듈을 이용, scattering law를 계산하여 생산한 라이브러리를 본 계산 라이브러리로 사용하였다. 그림 1에서 심벌로 표시한 값은 실험값이며 20K에 대한 실험값의 경우는 비록 3meV까지만 존재하므로 그 이하의 에너지영역에서 실제값과 이 라이브러리의 일치성은 확인할 수 없지만 14K에 대한 실험값과 비교하여 보면 NJOY97.45에서 컴파일한 라이브러리는 실험값에 잘 일치함을 볼 수 있다.

3. MCNP 모델

그림 2에 도시한 바와 같이 하나로 냉중성자 수직홀의 내반경은 8cm이다. 그 내부에 Zr 합금으로 만든 진공 용기를 설치하며 진공 용기 내부에 Al 합금으로 제작한 실린더형 또는 타원형과 같은 감속재 용기가 설치된다.

반사체로부터 감속재 용기에 유입된 열중성자는 냉중성자로 감속되어 냉중성자 빔튜브로 유도가 된다. 냉중성자 빔튜브와 냉중성자 수직홀과의 접합면에서 냉중성자원이 없을 때와 설치 후의 냉중성자속 비를 냉중성자 이득률이라 정의하였다.

노심 중심으로부터 반사체에 위치한 냉중성자 수직홀 중심까지의 직선거리는 약 52cm로서 MCNP의 Kcode를 이용한 criticality 계산을 통하여서는 5meV이하 냉중성자 영역의 중성자 수송을 계산하기 위해서는 매우 많은 계산 시간을 필요로한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 2와 같은 전체 노심 계산을 하지 않고 그림 3에 나타낸 것과 같은 Surface Source^(1,2)를 통한 coupled MCNP 모델을 구축하여 노심과 냉중성자원의 계산을 분리하여 계산함으로써 표1에 정리한 바와 같이 계산 시간을 현저히 단축시킬 수 있다는 이점을 통해 particle 수를 대폭 늘여 계산의 통계적 오차도 줄일 수 있었다.

4. 계산 결과

가. 경수 필름막 두께에 대한 이득률 민감도 분석

냉중성자원을 설치하면 구조적으로 냉중성자원의 진공용기 외곽과 냉중성자 수직홀 사이에 경수 필름막이 존재한다. 냉중성자 이득면에서 살펴보면 30℃의 온도를 갖는 경수 필름 두께에 따라 냉중성자원의 성능이 좌우된다고 할 수 있다. 본 계산은 이러한 경수 필름 두께에 따른 냉중성자 이득 변화를 살펴보았다.

계산을 위하여 내부에 설치될 감속재 용기는 0.2cm 두께를 가진 Al 합금으로 만들어졌으며 높이 17cm, 내반경 6.5cm인 실린더형이며 진공용기의 내반경을 조절함으로써 경수 필름막 두께를 변경하며 계산을 수행하였다.

그림 4에 계산 결과를 도시하였으며 예상한 바와 같이 경수 필름 두께에 따라서 냉중성자 이득에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 경수 필름 두께 0.05cm일 때 파장이 20.13Å 이하인 0.2meV~0.1meV사이의 에너지 영역에서 경수 필름이 없을 때와 비교하면 냉중성자 이득률이 46% 감소한 것을 알 수 있으며 평균 냉중성자 이득률은 34%가 감소하였다. 또한 경수 필름 두께 매 0.1cm 증가시 마다 순차적으로 31~34% 정도 평균 냉중성자 이득률이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과를 통하여 살펴볼 때 추후 냉중성자원 진공용기 설치 시 냉중성자 수직홀 내부의 형상 측정을 정밀히 하여 최대한 경수 필름을 제거해야하는 노력이 필요하다는 것을 알 수 있다.

나. 냉중성자원 orientation 선정을 위한 계산

최대의 냉중성자 이득을 얻기 위해서는 냉중성자 수직홀 내부에서 열중성자속을 최대한 이용하여 냉중성자로 감속된 중성자를 효율적으로 냉중성자 빔튜브 내부로 최대한 유도해야 한다. 그림 5에 냉중성자 수직홀 내부의 열중성자속 분포를 나타내었는데 최대의 열중성자속을 갖는 위치는 노심 방향이며 냉중성자 빔튜브에 근접할수록 열중성자속 분포가 낮아진다. 감속재 용기의 orientation을 정하기 위하여 높이 17cm, 두께 5cm를 가지는 타원형 감속재 용기의 위치를 변경하며 냉중성자 이득을 구하여 보았다. 계산 모델 1은 감속재 용기가 빔튜브 가까이 위치한 경우이며 계산 모델 2,3의 경우는 냉중성자 수직홀 중심에 위치하며 계산 모델 2의 경우는 빔튜브와 마주보는 각도이며 계산 모델 3의 경우는 노심에 평행하게 마주보는 각도에 위치한 경우이다. 계산 모델 4는 노심 가까이 위치한 경우이다.

표 2에 각각 모델의 계산 결과 값을 정리하였다. 표 2에서 보는 것과 같이 냉중성자원 내부의 냉중성자 생산 차원에서는 열중성자속이 높은 지점에 냉중성자 감속재 용기를 위치하는 것이 좋으나 생산된 냉중성자를 유도하는 차원에서 보면 냉중성자 빔튜브에 가깝게 위치시키는 것이 보다 유리한 방법임을 확인할 수 있다.

다. 감속재 용기 두께에 대한 이득률 민감도 분석

냉중성자 감속재 용기의 두께가 열중성자의 평균 자유 행정 거리인 3.4cm보다 충분히 길어야 열중성자가 적절히 감속되어 최대의 냉중성자속을 얻을 수 있다. 적절한 냉중성자 감속재 용기의 두께를 정하기 위하여 위에서 orientation 계산 결과를 토대로 냉중성자 빔튜브쪽에 타원형 감속재 용기를 두고 두께를 2cm에서부터 평균 자유 행정 거리의 두 배 이상인 8cm까지 변화를 주면서 계산을 하였으며 결과는 그림 6에 11Å과 9Å의 파장에 대하여 HFIR의 결과와 같이 도시하였다. 그림 6을 살펴보면 HFIR의 경우 9Å 이하의 파장을 가지는 냉중성자의 경우 7~8cm 정도의 두께까지는 감속재 두께가 증가할수록 이득률이 증가되지만 그 이상의 두께에서는 두께의 증가에 대한 특성이 포화되는 것을 확인할 수 있다. 9Å 이상의 파장에 대하여는 두께가 증가할수록 포화되지 않고 계속 이득률이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 장파장의 경우 중성자 자유 행정 거리가 훨씬 길어짐으로 냉각에 필요한 두께가 점점 증가하는 것에 기인한다고 생각된다. 본 계산의 경우는 9Å 이하의 파장을 가지는 냉중성자의 경우에도 두께의 증가에 따라 포화되지 않고 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 그림 1에 도시한 바와 같이 5meV 이하인 냉중성자영역으로 내려갈수록 산란 단면적이 감소함으로써 중성자의 자유 행정 거리가 길어지는 특성을 보여주는 라이브러리를 사용하여 계산한 결과라고 추론할 수 있다. 파장이 20.13Å 이하인 0.2meV~0.1meV사이의 에너지 영역을 살펴보면 2cm 두께일 때 보다 5cm 두께일 때 36% 정도 이득률이 증가하였으며 8cm 두께의 경우는 5cm 두께일

때보다 약 11.1% 정도 이득률이 증가하였음을 알 수 있다. 냉중성자 영역의 평균 이득률 증가의 경우 2cm일때보다 5cm 두께일 때 약 21% 증가되었으며 5cm에서 8cm로 두께가 증가하였을 시 평균 이득률이 13% 증가하였다. 액체 수소를 사용하였을 시 이론적인 감속재 용기의 두께는 3~5cm라는 외국의 사례⁽³⁾와 상이한 결과를 얻은 이유로는 외국의 경우 냉중성자 에너지 영역에서 산란 단면적이 para 수소보다 월등히 큰 ortho 수소와 para 수소를 혼합한 액체 수소로 계산 결과를 얻는데 기인하는 것으로 판단되며 이러한 추론은 HFIR의 계산 결과⁽⁴⁾를 살펴보다도 ortho 수소가 함유되지 않은 경우 감속재 용기 두께가 커질수록 이득률이 증대되는 결과와 일치한다.

라. 감속재 용기 형태 변경에 대한 이득률

감속재 용기의 형태를 타원형, 실린더형과 실린더형의 내부에 cavity를 둔 cavity형으로 변화를 주며 이득률을 계산하였으며 그림 7에 그 결과를 도시하였다. cavity 형에 대한 형태는 참고적으로 그림 8와 9에 도시하여 나타냈다. 실린더형의 경우 반경이 6.5cm이며 cavity형은 실린더형과 동일하나 내부에 그림 8, 9와 같이 진공으로 채워진 구멍을 낸 것이다.

계산 결과를 살펴보면 실린더형과 타원형의 경우를 비교하면 결국 감속재 두께는 동일하면서도 실린더형의 이득률이 상대적으로 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 타원형의 경우 두께가 중심에서 최대 두께가 나오며 상하 좌우 끝단으로 갈수록 좁아지는 타원형의 형태적인 특성에 기인한다고 볼 수 있다. cavity 형과 실린더형을 비교하여 보면 감속재 용기의 두께가 cavity 형이 낮음에도 불구하고 cavity를 통한 중성자 유도의 효율성이 증대됨으로 인하여 실린더형보다 냉중성자 이득률이 높은 것을 볼 수 있다. cavity형이 실린더형보다 더 적은 액체 수소 감속재를 사용하면서도 평균 34%의 냉중성자 이득률의 증대를 얻을 수 있었다. cavity형은 냉중성자 이득률이 높은 장점이 있으며 또한 발열량의 관점에서 살펴보면 para 수소의 g당 발열량이 1.69 W/g이며 Al 합금의 g당 발열량이 0.96 W/g이라는 기존 연구 보고서⁽⁵⁾를 참고하여 보면 Al 합금의 부피는 소량 증가하나 cavity가 생김으로 인하여 para 수소의 부피는 현격히 감소함으로써 총 발열량은 감소하는 장점이 있을 것으로 판단된다. 단점으로는 welding point가 실린더형과 같은 단순한 모형에 비하여 월등히 많아짐으로 인하여 안전성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론 및 토의

하나로에 설치될 냉중성자원의 감속재 용기에 대한 MCNP 계산을 수행하였다. 냉중성자 감속재로서는 액체 para 수소를 사용하였으며 감속재 용기의 orientation, 두께, 형태에 대한 변경을 통하여 계산한 결과 para 수소로 감속재 용기를 채울 경우 감속재 용기 두

계가 증대될수록 냉중성자 이득률이 증가하며 형태별로는 타원형보다는 실린더형, 실린더형보다는 cavity형이 냉중성자 이득률에 유리하다는 결론을 얻을 수 있었다. cavity형의 경우 가장 냉중성자 이득률이 유리하며 발열량이 실린더형보다 적을 것으로 예상되지만 welding point의 증대를 통한 안전성 측면에서 추후 더 연구가 필요할 것으로 판단된다.

그 외에 추후 필요한 연구로는 para 수소에 ortho 수소를 포함하는 pseudo 라이브러리를 생성하여 ortho 수소의 첨가에 따른 특성과 중수소의 첨가에 따른 특성 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 액체 수소의 경우 단상으로 가정하였으나 이상에 대한 계산도 추후 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고 문헌

1. Young-Sik Cho, Jonghwa Chang, Chang-oong Choi, "Conceptual Study for the moderator Selection of the Cold Neutron Source Facility for HANARO", Journal of the Korea Nuclear Society, 1998
2. Tai-Cheng Guung et al, "MCNP simulation of TRR-2 cold neutron source design", Physica B 311, 2002
3. Werner Gaubatz, "Optimization of the Cold Source of the FRM-2 using MCNP", International workshop on cold neutron utilization HANARO
4. D.L Selby et al, "High Flux Isotope Reactor Cold Neutron Source Reference Design Concept", Oak Ridge National Laboratory, USA, 1998
5. 최창웅 외, "냉중성자원 개발", 과학 기술처 보고서, 1996

표 1 전체 노심 계산과 Coupled MCNP 모델의 계산 시간 비교
(펜티엄 4 2.8GHz PC에서 계산)

	전체 노심 계산	coupled 모델
CUP count time(min)	4338	110~180
계산 particle	1억개	10억개
빔튜브 접합면에서 0.1meV~0.2meV 중성자속에 대한 통계적 오차	0.2020	0.0681

표 2 orientation 선정을 위한 감속재 용기 위치 변경에 따른 상대 이득 계산

(상대적 이득률= 계산 모델#의 냉중성자 이득률/ 계산 모델1의 냉중성자 이득률,
감속재 용기 내부의 냉중성자 이득률:

감속재 설치 후 용기 내부 중성자속/ 설치 전 용기 내부 중성자 속)

감속재 용기 내부 냉중성자 상대적 이득률	중성자 에너지	계산 모델1	계산 모델2	계산 모델3	계산 모델4
	0.1meV~0.2meV	1.0	1.063	1.085	1.152
	0.2meV~0.4meV	1.0	1.049	1.056	1.127
	0.4meV~0.6meV	1.0	1.049	1.061	1.122
	0.6meV~1meV	1.0	1.040	1.056	1.333
	1meV~5meV	1.0	1.042	1.052	1.200
빔튜브 접합면 냉중성자 상대적 이득률	중성자 에너지	계산 모델1	계산 모델2	계산 모델3	계산 모델4
	0.1meV~0.2meV	1.0	0.924	0.867	0.845
	0.2meV~0.4meV	1.0	0.857	0.872	0.912
	0.4meV~0.6meV	1.0	0.879	0.930	0.887
	0.6meV~1meV	1.0	0.902	0.923	0.920
	1meV~5meV	1.0	0.915	0.924	0.928

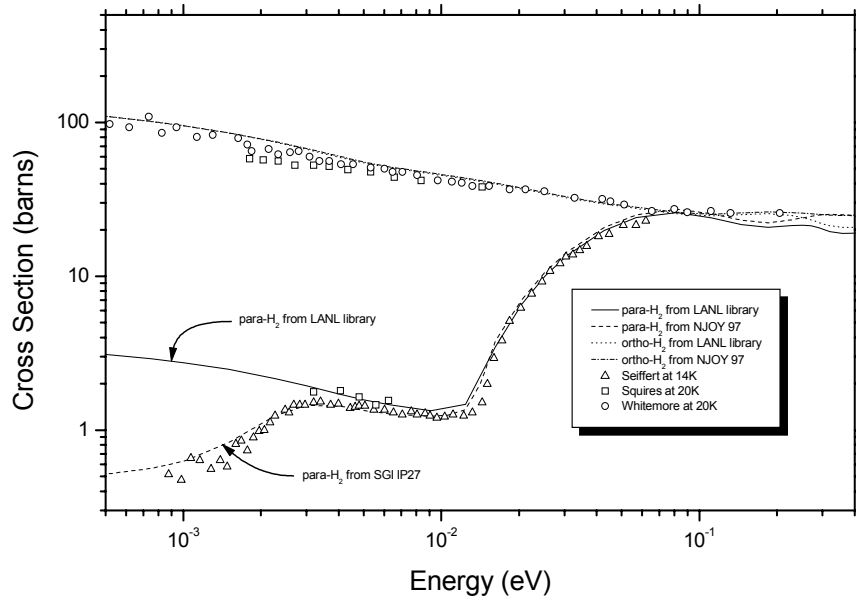


그림 1 액체 para 수소 비탄성 산란 단면적

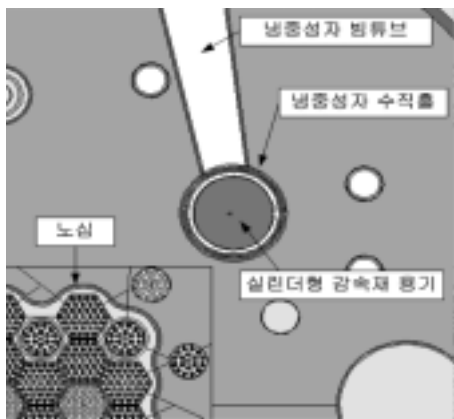


그림 2 전체 노심 MCNP 모델
x-y 단면도

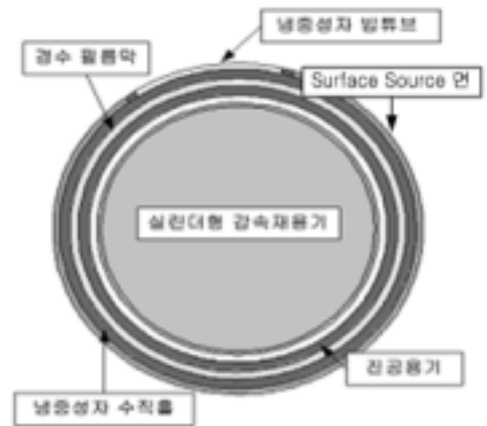


그림 3 Coupled MCNP 모델
x-y 단면도

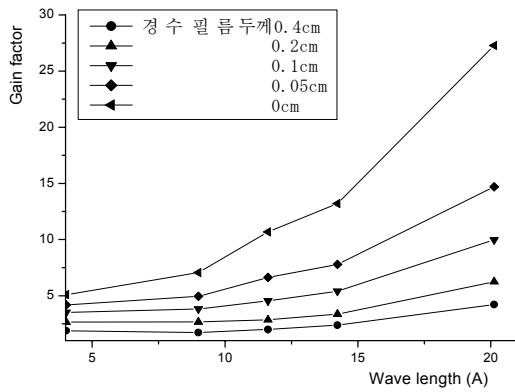


그림 4 경수 필름 두께에 따른 이득률 변화

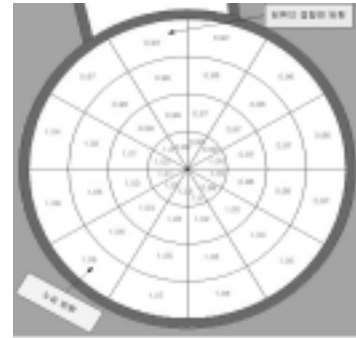


그림 5 CN공 내부 평균 열중성자속에 대한 상대 분율

※ 평균 열중성자속(0.625eV이하)
: 1.31205E+14

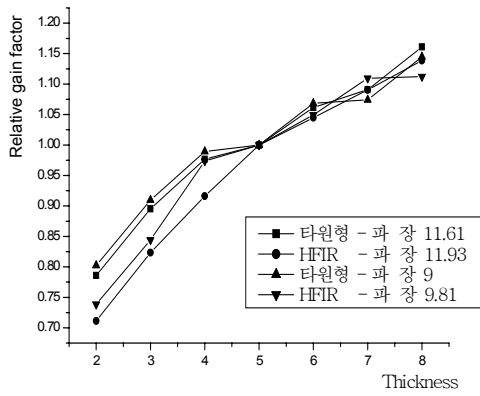


그림 6 타원형 감속재용기, HFIR의 두께에 따른 이득률 비교

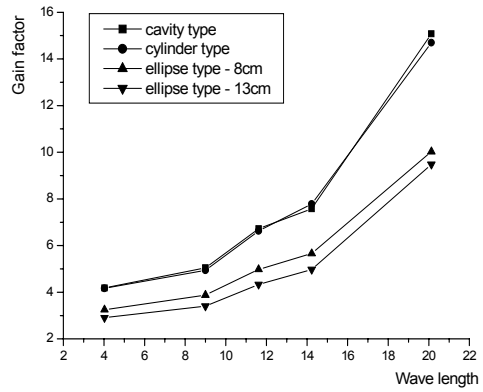


그림 7 감속재 용기 형태에 따른 이득률 계산



그림 8 cavity형 감속재 용기 x-y단면

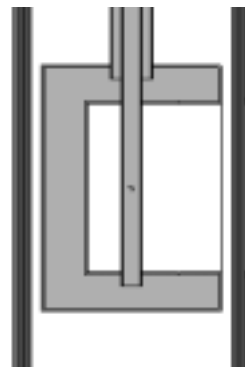


그림 9 cavity형 감속재 용기 x-z단면