

몬테칼로 모사를 이용한 고리1호기 고준위방사선장 해석

High-Level Radiation Field Analysis Using Monte Carlo Simulation in KORI Nuclear Power Plant Unit 1

이철우, 신창호, 김종경
한양대학교
서울 성동구 행당동 17

요약

원전 내부에서의 방사선장 분포에 관한 정보는 안전성 확보의 기본이 되는 중요한 자료이다. 이번 연구에서는 몬테칼로 방법을 사용하는 MCNP코드로 개발한 해석체계와 모델링을 이용해 고리1호기 원전 내 고준위방사선장을 해석하였다. MCNP코드의 기능을 이용해 선원항 계산과 원전 내부 방사선장 해석의 2단계로 구분하는 계산체계를 구성하고, 고리1호기를 대상원전으로 하여 격납건물 내부에 대한 모델링을 수행하였다. 이를 통해 20주기 운전환경을 모사하여 얻은 선원항에 의한 원전 내 방사선장 분포를 계산하였다. 선원항으로 모사한 노심에 대해 임계도 및 출력분포 계산 결과 2.96%의 RMS 오차를 확인하고 선원항을 계산하였다. 이 선원항을 이용해 원전 내부 총 6개 지점에서 전산코드로 모사한 중성자스펙트럼을 산출하였다. 계산된 스펙트럼은 격납건물 내 측정된 중성자스펙트럼과 유사한 경향을 갖는 것으로 나타났다. 원전 내부 동일 지점에 대해 산출한 중성자플루언스를 이용해 방사선장 분포를 해석하였다. 계산결과 20ft위치의 증기발생기 외벽 두 지점과, 증기발생기 룸 외부 외부에서 각각 최대 1.3127×10^3 neutrons/cm²sec, 1.874×10^3 neutrons/cm²sec, 1.002 neutrons/cm²sec, 44ft위치의 증기발생기 외벽 두 지점과, 증기발생기 룸 외부 외부에서 각각 최대 4.587×10^3 neutrons/cm²sec, 4.579×10^3 neutrons/cm²sec, 20.63 neutrons/cm²sec로 계산되었다.

Abstract

It is requested basically to make certain Safety information about distribution of radiation field inside nuclear power plant. It was performed to analysis of radiation field in KORI unit 1 cycle 20 by using the modeling and construction

of calculation system. By using the function of MCNP code, calculation system was constructed to divide source term and the others, the inside of plant, and modeling was performed for KORI nuclear power plant unit 1. Calculation system and modeling was verified using these for circumstance in cycle 20 and analysis of distribution of radiation field was performed from source term. first, source term that had been verified for practical reactor core about 2.96% of error was calculated. Neutron spectrum was evaluated for six points of inside of containment building. Calculated value are with real detected value, neutron spectrum, it was conformed. At last it was tested by evaluating the fluence the level of radiation field. It was calculated at two points near the boundary of steam generator and one point out of room of steam generator. 1.3127×10^3 neutrons/cm²sec, 1.874×10^3 neutrons/cm²sec, 1.002 neutrons/cm²sec are evaluated in maximum at the level of 20ft. 4.587×10^3 neutrons/cm²sec, 4.579×10^3 neutrons/cm²sec, 20.63 neutrons/cm²sec are evaluated for same points at the level of 44ft.

1. 서론

원자력발전소의 설계 및 운영에 있어 가장 기본적으로 요구되는 것은 원전 내부의 방사선장 분포에 관한 정보이다. 특히 격납건물 내의 고준위방사선장에 대한 정보는 설계단계에서의 예측과 운전단계에서의 원전운영에 있어서 중요한 정보가 되며, 특히 ICRP60을 적용한 피폭평가를 위해 방사선스펙트럼의 정확한 평가를 필요로 한다.

원전 내 고준위방사선장을 평가하기 위한 가장 기본적이고 신뢰성 있는 방법은 검출기를 이용한 실측정이다. 그러나 이 방법은 시간과 장비의 확보 등과 관련한 효율성·경제성 등에서 많은 어려움을 가지며, 원전 내부의 전 구간에 대해 방사선장의 분포를 얻을 수 없어 주요 계측 지점으로부터 유추해내어야 하는 근본적인 문제점을 지니고 있다. 검출기를 사용한 측정의 문제점은 방사선 수송해석 코드를 이용한 전산모사의 방법으로 극복할 수 있다. 전산모사를 통한 방사선장의 해석은 원전 내 전구간에 대해 운전 중의 실시간 정보 및 원하는 시점에서의 정보를 얻어낼 수 있다. 그러나 전산모사의 해석방법 역시 복잡한 기하학적 구조를 완벽히 구현하거나 실제 운전환경을 모사하는 것에 한계를 지니고 있어 원전 내 특정 영역에 대한 방사선장 해석에만 제한적으로 이용되고 있다.

이번 연구에서는 원전 내 방사선장 해석체계를 구성하고, 몬테칼로방법의 MCNP 코드를 이용한 실제 가동원전의 운전환경을 구현하는 모델링을 통해 원전 내 고준위방사선장 해석을 수행하였다. 모델링은 고리 1호기 격납건물 내부 전 구간을 대상으로 하였으며, 20주기의 노심 선원항에 의한 중성자 스펙트럼을 계산하여 구성한 해석체계와 모델링을 검증하고 방사선장을 계산하였다.

2. 해석체계의 구성과 방사선장 해석 모델링

2.1 해석체계의 구성

원전의 운전환경을 모사하는 것은 크게 두가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째는 매우 방대하고 복잡한 내부구조를 기하학적 모델링의 능력이 제한된 전산코드로 어떻게 허용 가능한 수준까지 실제에 근접한 묘사할 것인가 하는 문제이며, 둘째는 관심대상인 방사선선원을 실제 운전환경에서 발생하는 것과 동일하게 구현하는 것이다.

이에 이번 연구에서는 해석체계를 2단계로 구성해 고준위방사선장의 주요 선원항인 노심과 원전 격납건물 내에서의 방사선장 분포 계산으로 구분해 계산을 진행하였다. 첫 번째 단계에서는 대상 주기의 노심환경을 모사한 후 해당 핵설계보고서^[3]와 비교하여 계산결과를 검증하고, 이 단계에서 발생한 방사선을 노심용기 외벽에 기록하여 선원항으로 만들어 내었다. 두 번째 단계에서는 원전 내부를 모델링하고 이전 단계에서 얻은 선원항을 읽어들이어 고준위방사선장 구역의 방사선 에너지스펙트럼을 계산하였다.

2단계 해석의 과정의 호환을 위해 전산코드는 계산 결과의 기록과 처리 기능(SSR/SSW 옵션)이 가능하며 기하학적 모델링 능력이 우수한 것으로 평가되는 MCNP4C3 전산코드를 사용하였다. 대상원전은 웨스트하우스형인 고리1호기로 선정하여 최근의 20주기 운전환경을 모사하였다.

2.2 방사선 선원항 모델링

가능한 실제에 가까운 선원항을 획득하기 위해 핵연료봉 수준까지 실제 설계치와 핵설계보고서 상의 노심운전 상태를 동일하게 모사하였다. 또한, 원전 내부 구조물의 비대칭성을 고려해 다음 단계에서 사용할 정확한 선원항을 획득하기 위해 원주 방향 축방향으로 노심 전체를 모사하였다. MCNP 전산코드의 KCODE 결과를 이용해 실제 노심 운전 상태와 비교하여 선원항 모델링을 검증하였고, 발생한 방사선을 원자로심 압력용기 외벽에 기록해 다음 단계에서 선원항으로 입력할 자료를 획득하였다. 노심계산 결과 획득한 선원항에 대하여 방사선스펙트럼을 구하여 스펙트럼의 경향을 평가하였다.

원자로심 모델링 결과를 축 방향과 원주 방향에 대하여 각각 그림 2와 그림 3에 나타내고, 그림 4에 획득한 방사선스펙트럼을 나타내었다.

2.3 격납건물 모델링

원전 내 방사선장 해석을 위한 격납용기 내부 모델링은 매우 복잡한 내부 구조물의 완벽한 묘사가 불가능한 어려움을 가지고 있다. 따라서 방사선장 분포에 대한 영향의 정도와 MCNP코드의 기하학적 구현 능력의 한계를 고려하여 가능한 실제에 접근하면서 전산모사에 효율적인 모델을 구현하여야 한다. 방사선의 수송 및 방사선장의 분포에 큰 영향을 미치는 요소는 콘크리트벽 등의 차폐 구조물과 물로 차있는 내부 배관 및 증금속을 함유한 합금으로 구성된 다양한 기기구조물 등이다. 콘크리트 벽 구조물의 경우 FSAR 설계치를 근거로 실제와 동일하게 묘사하였다. 단 FSAR의 설계도로 확인이 어려운 일부 미세한 형상은 인접구조물에 외삽하였다. 다양한 각종 배관의 경우 격납 건물 내부의 일차계통 등의 큰 구조물을 제외한 복잡하고 미세한 배관은 생략하였다. 실제로 이들 중 대다수는 콘크리트 벽 내부에 위치하여 콘크리트를 묘사한 것으로 대신하였다. 피폭에 관련한 관심 대상인 주요 작업공간에 위치한 구조물의 경우 그 존재로 인해 공간에서의 방사선장이 교란되는 등의 효과를 나타내게 되므로 주요 관심 위치에 관련하여 증기발생기, 원자로냉각수펌프, 가압기 등을 묘사하였다. 이들 구조물은 그 형상이 매우 복잡하고 구성 부품마다 합금의 종류가 틀리는 등 설계 그대로의 형상을 묘사하는데 어려움이 있어 실린더 형태로 단순화시키고, 구성물질 데이터를 근거로 내부를 균질화하여 묘사하였다. 구현한 원전 내부 모델링을 그림 3, 그림 5와 그림 7에 나타내었다. 아울러 그림 4, 그림 6, 그림8에 바닥면으로부터 6 ft, 20 ft, 그리고 44 ft 위치 각 작업층의 실제 설계단면을 나타내어 MCNP로 모델링한 결과와 비교하였다. 구현한 모델링을 검증하기 위해 두 개 층에 대해 각각 세 개 지점을 선정하여 중성자스펙트럼을 계산하였다. 중성자 스펙트럼의 산출 위치는 격납용기 바닥 면으로부터 20 ft, 그리고 44 ft 지점의 작업자 출입이 이뤄지는 주요 작업공간을 선정하였다. 각 작업층에 대해 증기발생기가 있는 콘크리트 벽면으로부터 30 cm 떨어진 2곳과 증기발생기 룸 외부 벽면에서 30 cm 떨어진 곳을 측정위치로 지정을 하고 각각 중성자 스펙트럼을 측정하였다. 그림 5, 그림 7에 표시된 A, B, C와 D, E, F는 각각 20ft, 40ft에서의 전산모사를 통해 얻은 스펙트럼을 계산한 지점이다.

3. 모델링을 이용한 격납건물 내 방사선장 계산 결과

3.1 선원항 계산결과

고리 1호기 20주기 노심 BOC에서의 상대출력분포 및 임계도를 계산하여 해당 주기의 핵설계보고서와 비교하여 선원항 모델링을 검증하였다. 임계도 계산 결과, 유효증배계수는 1.00265 ± 0.0002 로 계산되었다. 이에 수반하여 고리 1호기 20주기 BOC에서의 상대출력분포를 획득하였으며, 그 결과는 핵설계보고서와 비교하여 RMS 오차 2.96%^{[4][5]}로 계산되었다. 그림 9 에 KCODE 계산결과인 고리 1호기 20

주기 BOC에서의 상대출력분포를 핵설계보고서의 값과 비교하여 나타내었다. 노심 모사 결과 원자로 압력용기 외벽을 지나는 방사선을 기록하여 다음 단계의 입력데이터로 사용할 수 있도록 하였다. 기록된 방사선선원의 스펙트럼을 산출하여 그림 10에 나타내었다.

3.2 격납건물 내 중성자 스펙트럼 계산결과

방사선장 해석을 위한 격납건물 내부 모델링을 검증하기 위해 주요 작업을 고려해 세 개의 지점을 선정하여 중성자 스펙트럼을 계산하였다. 계산된 스펙트럼을 1998년 “전력연구원 기술보고서“ 상의 실측 데이터의 경향^[3]과 유사함을 확인하여 구현한 모델링을 검증하였다. 계산한 스펙트럼은 그림 11에 나타내었다.

선원항 계산에서 얻은 결과를 이용해 격납용기 바닥 면으로부터 6 ft, 20 ft, 그리고 44 ft위치 의 주요 작업층에 대해 선정된 지점에서 중성자 플루언스율을 계산하여 스펙트럼과 함께 방사선장 분포 해석에 이용하였다. 20 ft 작업층 모델링 결과에서 증기발생기 외벽 A 위치에서의 경우 최대 1.3127×10^3 neutrons/cm²sec, B 위치에서는 1.874×10^3 neutrons/cm²sec로 계산되었고, 증기발생기 룸 외부의 C 위치에서는 1.002 neutrons/cm²sec로 계산되었다. 이론상으로 선원에 근접한 A 위치에서 스펙트럼이 높게 나타날 것으로 예상되나, 실제로 B 위치의 스펙트럼이 A 위치보다 높게 나타나는 결과를 보인 것은 B 위치의 측정 공간에 인접하여 위치한 콘크리트 구조물 등의 영향으로 노심에서 발생된 선원이 반사반응 등을 통해 B 위치로 Streaming 되는 효과를 갖는 등의 방사선장 교란효과 때문이다. 44 ft 작업층 모델링 결과에서 증기발생기 외부 D 위치에서는 최대 4.587×10^3 neutrons/cm²sec, E 위치에서는 4.579×10^3 neutrons/cm²sec로 계산되었고, 증기발생기 룸 외부의 F 위치에서는 20.63 neutrons/cm²sec로 계산되었다. 스펙트럼의 형태는 20 ft에서 계산결과와 동일한 형태로 나타났다. 단, 44 ft 위치에서의 중성자 스펙트럼이 20 ft의 위치에서 보다 높게 계산된 것은 직접적인 선원항이 되는 원자로 압력용기가 44 ft 위치에서는 노출된 공간에 위치하여 20 ft 위치에서보다 콘크리트에 의한 차폐효과가 떨어지기 때문이다.

4. 결론 및 제언

이번 연구에서는 원전 운전환경에서의 고준위방사선장을 해석하기 위한 전산코드 모사 모델링을 수행하고, 측정된 중성자 스펙트럼을 이용하여 해석체계를 검증하고, 그를 이용해 계산한 방사선장을 해석하였다. 주요 중성자 선원항으로 운전중 노심을 모사하여 발생한 방사선을 검증의 비교 결과로 사용하였다. 그 결과 기존에 시도되었던 노심 내 핵분열밀도를 통해 선원항을 구하고 이를 SDEF카드로 읽어들이 매우 단순한 형태의 모델을 사용하여 계산했던 체계^[3]에 비해 정확한 것으로 나타났다. 따라서 기존에는 수용하기 어려웠던 전산모사를 통한 원전 내 방사선장 해석

이 가능한 것으로 판단된다.

향후 검증된 모델링을 이용해 궁극적으로 실제 운전 중 작업자의 피폭량 예측 등 실질적인 방사선량을 획득하기 위해서는 계통선원항, 방사화선원항 등의 다양한 선원항을 연계하여 실제 운전환경과 일치시키기 위한 분석과 검증이 필요하다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부 원자력중장기사업 및 방사선안전신기술연구센터의 지원과 한국수력원자력(주)의 협조에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김재식 외, "The Nuclear Design Report for Kori Nuclear Power Plant Unit 1 Cycle 20," KNF-K1C20-01034, 한국수력원자력(주), 2001.
2. 한국전력공사, "Final Safety Analysis Report: Kori Unit 1,"
3. 신상운 외, "원자로 건물내 중성자 스펙트럼 측정 최종보고서," TR.96NS11.S1998.55, 전력연구원, 1998.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Calculation and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence," Regulatory Guide 1.190, 2001
5. Aaltonen. Pertti, "Computing Radiation Dose to Reactor Pressure Vessel and Internals," NEA/NSC/DOC(96)5, OECD/NEA, 1996
6. 김종경 외, "원자로 압력용기 건전성 평가 연구 최종보고서," KINS/HR-245, 한국원자력안전기술원, 1999.
7. Paula C. Fazio, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials, 1993.

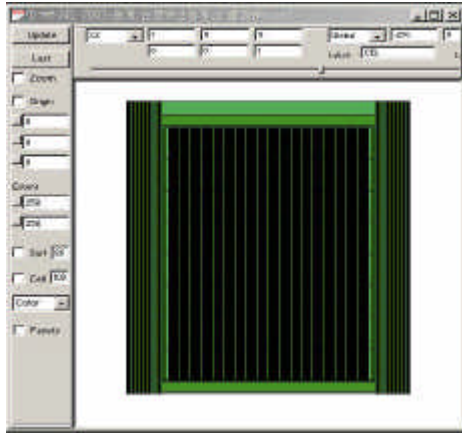


그림 1. 고리 1호기 20주기 원자로심 모델링 축방향 단면도

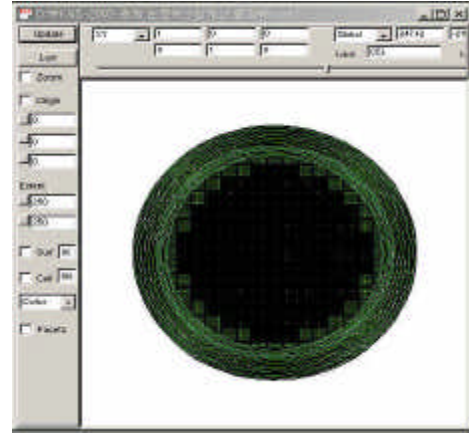


그림 2. 고리 1호기 20주기 원자로심 모델링 원주방향 단면도

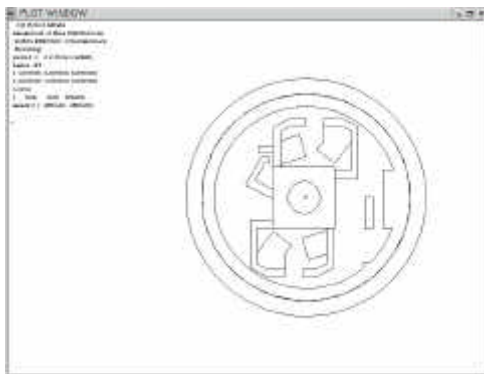


그림 3. 고리 1호기 격납건물 6ft에서의 단면도

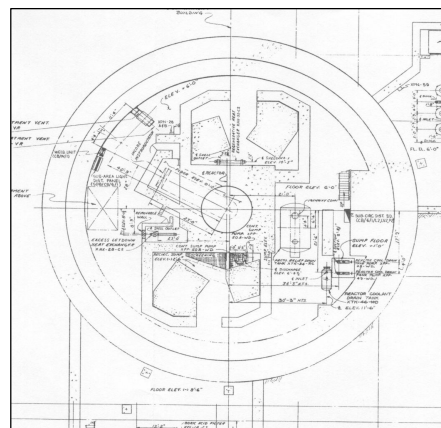


그림 4. 고리 1호기 격납건물 6ft에서의 FSAR 설계도

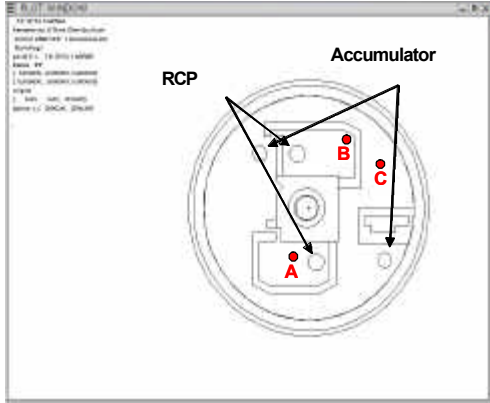


그림 5. 고리 1호기 격납건물 20ft에서의 단면도

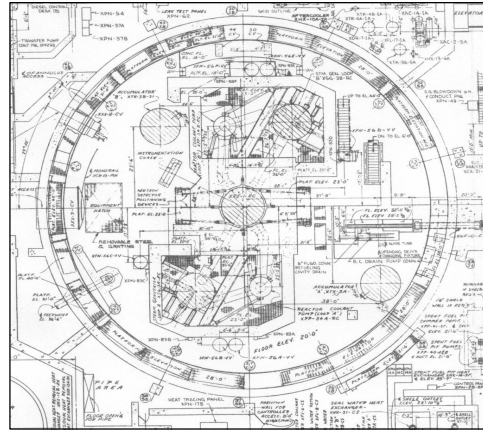


그림 6. 고리 1호기 격납건물 20ft에서의 FSAR 설계도

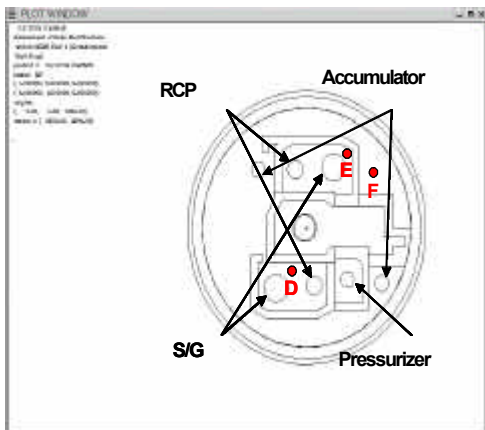


그림 7. 고리 1호기 격납건물 44ft에서의 단면도

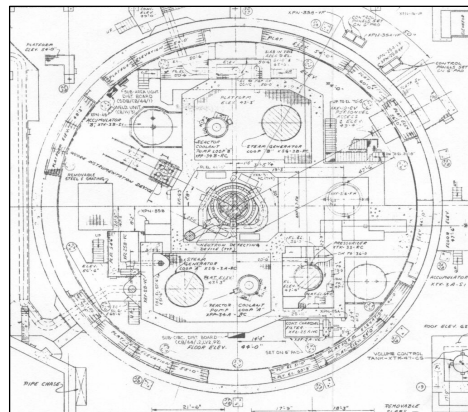


그림 8. 고리 1호기 격납건물 44ft에서의 설계도

					0.8280		
					0.8394		
					-1.3768		
				1.2480	1.1530	0.4110	
				1.1852	1.1280	0.4270	
				5.0321	2.1683	-3.8929	
			1.1710	1.2230	1.2150	0.9980	
			1.1544	1.1792	1.1641	1.0315	
			1.4176	3.5814	4.1893	-3.3567	
	1.2010	0.9370	1.2730	1.0110	1.2080	0.3530	
	1.1856	0.9536	1.3023	1.0182	1.2337	0.3731	
	1.2823	-1.7716	-2.3016	-0.7122	-2.1275	-5.6941	
NDR	0.9490	1.1440	1.1170	1.0490	1.1610	1.1100	0.4190
MCNP	0.9340	1.1199	1.1302	1.0725	1.1666	1.1106	0.4307
Error	1.5806	2.1066	-1.1817	-2.2402	-0.4823	-0.0541	-2.7924

$K_{eff} = 1.00265 \pm 0.0002$ RMS Error = 2.96%

그림 9. 상대출력분포

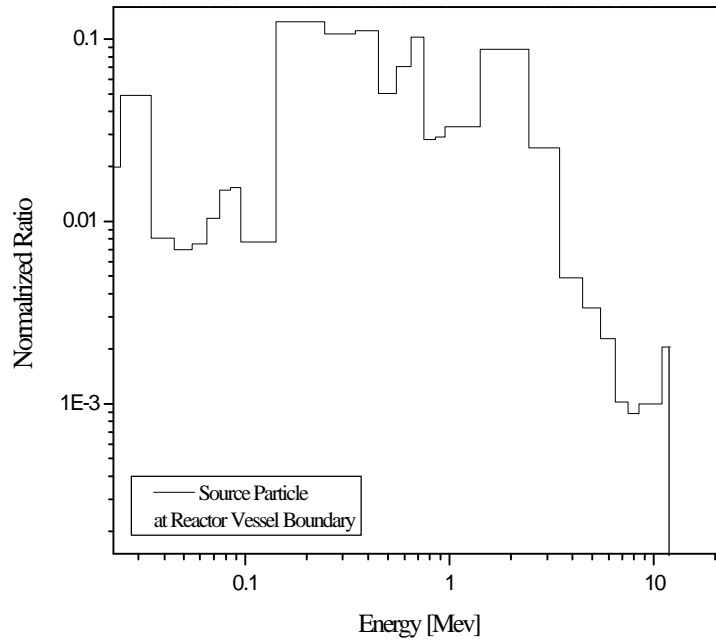
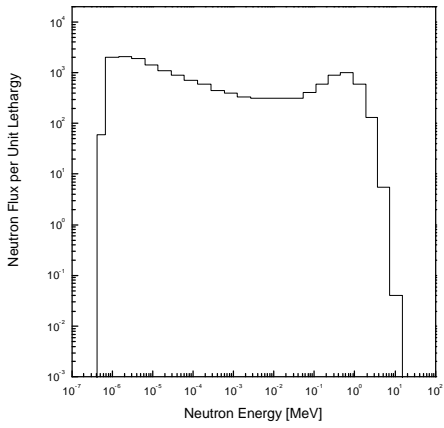
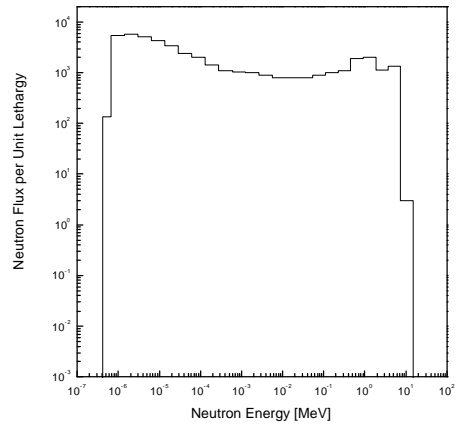


그림 10. 원자로 압력용기 외벽에 기록된

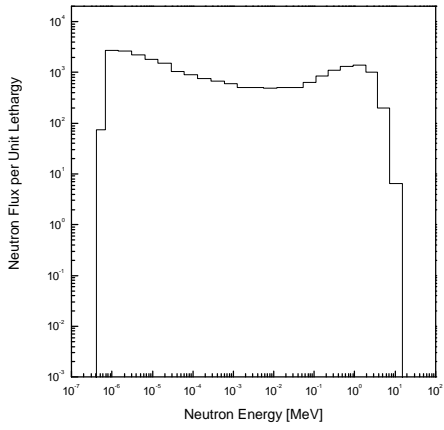
중성자 선원 스펙트럼



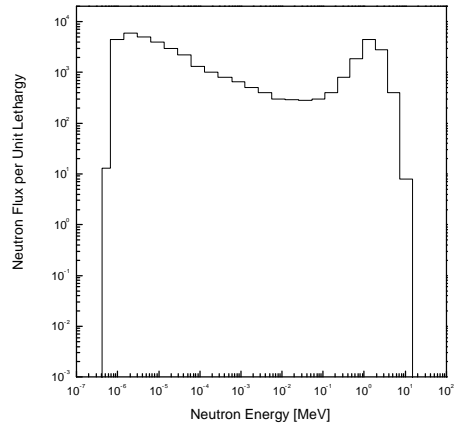
A 지점



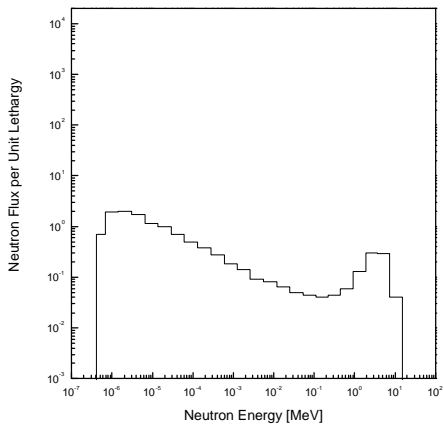
D 지점



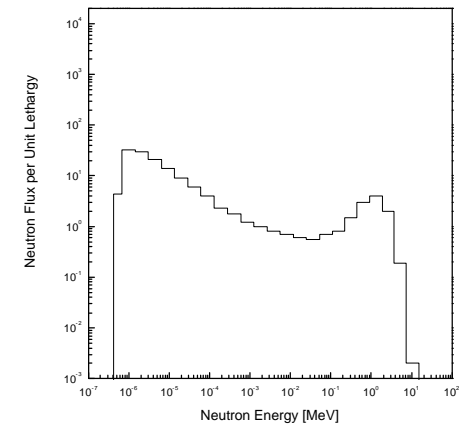
B 지점



E 지점



C 지점



F 지점

그림 12. 바닥으로부터 20ft (A, B, C)와 40ft (D, E, F) 지점에서의 중성자 스펙트럼