

고리 1호기 압력용기 수명연장 연구

A Study on Life Extension of the Kori Unit 1 Reactor Pressure Vessel

김중경, 신창호, 서보균
한양대학교

이경진
조선대학교

요 약

원전의 수명은 속중성자에 의한 원자로 압력용기의 조사취화 현상에 의해 결정된다. 원자로 압력용기의 건전성을 저하시키는 속중성자의 조사량을 감소시키기 위하여 고리 1호기 14주기 원자로심을 대상으로 노심외곽구조물에 새로운 추가차폐체를 설치하고 조사량 감소효과를 분석하였다. 압력용기에서의 속중성자 플루언스의 정확한 예측을 위하여 MCNP4A 코드를 이용, 노심을 정밀하게 모델링하고 몬테칼로 모사를 수행하였다. 여러 가지 형태, 재질의 차폐체를 다양한 위치에 설치한 후 결과분석을 통하여 최적 차폐체 설계안을 도출하였다. 최적 설계안의 경우 압력용기 중심부의 용접부위에서 39% 정도의 속중성자의 조사량 감소가 있었으며, 이로 인해 현 예측수명보다 4.6 EFPY의 수명연장 효과가 있는 것으로 나타났다. 새로운 차폐체 설치로 인한 노심 내부의 열수력학적 영향은 무시할 수 있을 것으로 나타났다.

Abstract

The life of a reactor is directly dependent on the embrittlement of the reactor pressure vessel (RPV) under fast neutron irradiation. To reduce the fast neutron fluence which deteriorates the integrity of RPV, the additional shields were installed at outer core structures of the Kori Unit 1 reactor and its reduction effect was examined. Full scope Monte Carlo simulation with MCNP4A code was made to analyze the fast neutron fluence at the RPV. Various geometries and materials were examined for the additional shields, and finally an optimum model was determined. In this modified case, the fast neutron fluence at the circumferential weld of RPV was decreased by 39%, and therefore the extended plant lifetime, 4.6 EFPY, was expected. Thermohydraulic factors such as flow rate and DNBR at the core internal were little influenced by the establishment of the optimum additional shields.

1. 서론

국내 최초로 상업운전을 시작한 고리 1호기는 잔여수명이 약 10년 정도 남아 곧 폐로 작업을 준비해야 한다. 그러나 신규발전소를 건설해야 하는 경제적인 부담과 부지 확보의 어려움 등이 있어 원전의 설계수명 연장에 관심이 모아지고 있다. 원전의 설계수명은 압력용기의 건전성에 의해 크게 좌우되며, 압력용기의 건전성 저하의 주요 원인인 속중성자 조사를 효과적으로 감소시킬 수 있다면 그로 인한 설계수명의 연장 또한 기대할 수 있다. 고리 1호기와 같이 오래된 원자로의 압력용기의 경우 구리, 니켈 및 황의 함유량이 많아 중성자에 의한 재료의 조사취화 현상이 더욱 심각하게 나타난다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 압력용기의 중성자 조사량을 감소시키기 위한 여러 가지 방안 중 노심 내부에 가장 적은 변화를 야기할 것으로 예상되는 방법을 채택하였다. 이는 노심의 외곽구조물인 Baffle, Barrel, Thermal Shield 등에 새로운 중성자 차폐체를 설치하여 가장 효과적인 최적 차폐체 모델을 찾고 아울러 새로운 차폐체 설치로 인한 설계수명의 연장 연수를 산출하였다. 또한 결정된 최적 차폐체를 설치하였을 때 열수력학적 측면인 원자로심의 유량률과 DNBR의 변화에 대해 검토하였다.

2. 중성자 조사량 평가방법

원자로 압력용기의 건전성을 확보하고 궁극적으로 원자로의 설계수명 연장을 위해서는 무엇보다도 압력용기에서의 중성자 플루언스가 정확하게 평가되어야 한다. 현재 원자로심에서의 중성자 플루언스 계산에는 각분할법과 몬테칼로 방법이 이용되고 있는 데, 정밀한 3차원 모델링이 가능하고 연속 에너지, 각도에 대한 수송계산이 가능한 몬테칼로 방법이 압력용기의 수명연장 연구에는 더욱 적합하다고 판단되었다. 고리 1호기 14주기 원자로심을 대상으로 MCNP4A와 CASMO 전산코드를 이용, 압력용기에서의 중성자 조사량 평가체계를 구축하였다.^(2,3,4)

고리 1호기 원자로 압력용기는 SA508 C1.2 단조강으로 제작된 것이며, 그림 1과 같이 노심대 상부, 하부 및 중심부에 용접선이 있으며, 용접재는 Linde 80 Flux와 Mn-Mo-Ni 채움재이다. 속중성자에 의한 재료의 취화현상은 구리 및 니켈의 함유량이 많으면 증가하는 경향이 있는 데, 고리 1호기 압력용기의 화학성분 분석결과에 의하면 압력용기강 보다 용접재가 더 많은 함유량을 보이고 있어 중성자 조사량이 가장 많은 노심 중심부에 위치한 용접부위가 압력용기 중 가장 취약한 부분으로 나타났다.⁽⁵⁾ 그림 2는 추가차폐체 설치가 없는 기존 노심의 압력용기 중심부 용접부위에서의 원주방향 각도별 속중성자 (1 MeV 이상) 플루언스 결과를 나타낸 것이며, 그림 3은 압력용기 내부의 1/10T, 1/4T, 3/4T의 깊이별로 플루언스 결과를 나타냈다. 두 개의 결과 그림에서 알 수 있듯이 압력용기 내벽 및 내부의 구분 없이 모든 지점에서 원주방향으로 0° ~ 15° 영역이 최대값을 나타내고 있다. 이 부분의 최대값을 어느 정도로 감소시킬 수 있는 지가 수명연장 가능성 및 수명연장 정도를 결정한다고 할 수 있다.

3. 차폐체 재질의 선정

추가차폐체가 가져야 할 요건은 노심 내부에서 발생하는 연속스펙트럼의 속중성자를 압력용기에 도달하지 못하도록 산란 또는 흡수반응을 통해 효과적으로 제거할 수 있어야 하며, 고온고압의 환경에서 구조적으로 건전성이 유지될 수 있고, 쉽게 구할 수 있는 값싼 물질일수록 좋다. 노심의 반응도 측면에서는 추가되는 차폐체가 열중성자 영역에서 흡수단면적이 매우 크면 차폐체를 삽입했을 때 외곽 반사체 영역의 기능을 저하시켜 핵연료의 연소도가 떨어지는 등 기존 노심에 비해 노심 환경이 상당히 변할 수 있으므로 열중성자 영

역에서의 차폐물질의 흡수단면적 또한 고려하여야 한다.

압력용기를 취화시키는 에너지 영역인 1 MeV 이상에서는 핵종별 미시적 전반응단면적은 매우 작은 값을 가진다. 그러므로 중성자가 대부분의 물질과 반응할 확률은 작으나, 원자번호가 증가함에 따라 조금씩 커지는 경향이 있으므로 원자번호가 크고 밀도가 높은 물질이 속중성자 감소에 효과가 있을 것으로 예상되었다. 간단한 모델을 이용해 위의 조건에 부합하는 여러 가지 재질을 비교 계산한 결과 Tantalum과 SS-304를 기본 차폐물질로서 채택하였다. 따라서 이미 모델링 되어 있는 실제 고리 1호기 노심의 외곽구조물에 설치, 적용한 후 속중성자 조사량 감소효과를 분석하였다.

4. 추가차폐체의 설치

압력용기의 중성자 조사량 감소를 위해 추가차폐체를 설치할 수 있는 공간은 그림 4와 같이 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. Baffle과 Barrel 사이, Barrel과 Thermal Shield 사이(Bypass), Thermal Shield와 Vessel 사이(Downcomer)로 나눌 수 있으며 이 공간은 모두 냉각수로 차 있다. 기존 노심을 구성하고 있는 구조물은 변경할 수 없으므로, 냉각수가 차 있는 이 공간을 활용하여 노심의 열수력학적 기능을 저하하지 않는 범위 내에서 추가차폐체를 설치, 활용하여야 한다. Downcomer의 경우 주 냉각수의 출입통로이므로 큰 규모의 차폐체 설치에는 제약이 있으며, 또한 감시캡슐이 위치하고 있어 캡슐이 위치한 부분은 피해서 설치하여야 한다. 이에 비해, Baffle과 Barrel 사이와 Bypass는 Downcomer 보다 차폐체 설치의 열수력학적인 제약이 적으므로 적극 활용할 수 있는 공간이다. Baffle-Barrel 사이는 전체적으로 넓은 공간이기는 하지만, 그 폭이 일정하지 않아 차폐체 형태에 제약이 있으며, Bypass는 두께가 3.8cm 밖에 되지 않는 좁은 공간이다. 그러므로 효과적인 차폐체의 기하학적 형태 결정 또한 속중성자 감소효과에 중요한 인자로 작용한다고 할 수 있다.

추가차폐체는 크게 봉집합체 형태와 패드 형태로 분류하여 설치하였다. 봉집합체 형태는 핵연료집합체를 구성하고 있는 핵연료봉처럼 차폐물질로 봉을 만들고, 이를 사각 격자구조에 배열하였으며, 주위로 냉각수가 흘러갈 수 있도록 하였다. 봉집합체 형태는 부피를 많이 차지하기 때문에 Baffle-Barrel 사이에만 설치할 수 있었다. 패드 형태는 노심 외곽구조물을 따라서 원주방향으로 설치하였는데, 두께를 조절하면서 얇게 설치가 가능하므로 위치의 제약 없이 설치할 수 있었다. 한 장의 패드를 두겹게 설치한 단일패드와 얇게 여러 장으로 나누어 설치하고 사이공간에 냉각수가 흘러갈 수 있도록 한 반복패드 형태로 설치하였다. 패드 형태의 추가차폐체의 경우 중성자 조사량이 많은 부분을 고려하여 원주방향으로 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 부위만 패드를 설치하는 부분설치와 이와 상관없이 전체를 두르는 전체설치로 나누어 설치하였다.

5. 추가차폐체 설치 후의 감소효과

패드형태의 추가차폐체의 설치 위치에 따른 영향은 원자로심 내부로 들어갈수록 더욱 조사량 감소에 효과가 있었다. 즉, Downcomer 보다는 Bypass, Bypass 보다는 Baffle-Barrel 사이에 추가차폐체를 설치할수록 전반적인 속중성자 감소효과가 좋아졌으며, Downcomer에만 설치하는 경우는 오히려 추가차폐체를 설치하지 않은 기존 노심보다 오히려 좋지 않은 결과를 나타내었다.

용접부위만 가리기 위해 압력용기 용접선 부위에 단일패드를 설치한 경우에는 예상과는 달리 아무런 효과도 없었다. 용접부위의 속중성자 조사량 감소를 위해서는 비교적 넓은 부분의 차폐체 설치가 필요하다는 것을 의미한다. 전체설치로 효과가 있었던 차폐체인 경우는 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 의 부분설치로 그 효과를 다시 확인해

보았는 데, 압력용기 용접부위에서의 속중성자 조사량의 최대값을 줄이는 대신 플루언스가 많지 않은 부분 ($15^{\circ} \sim 45^{\circ}$)은 약간의 상승이 있었다. 속중성자 플루언스의 최대값에 의해 압력용기의 수명이 결정되므로 이는 고무적인 현상이라 할 수 있다.

같은 위치에 단일패드와 반복패드를 번갈아 사용해보면서 효과를 비교해 보았는 데, 일반적인 경향은 발견하지 못했다. 다만 재질에 따라 단일패드가 더 효과적일 경우도 있었고, 반복패드가 효과적인 경우도 있었다. SS-304를 패드로 사용할 때는 반복패드가 효과가 있었으며, Tantalum의 경우는 반대로 단일패드가 더 나은 효과를 나타내었다.

봉집합체 형태의 경우 외부와 내부가 동일한 재질로 이루어져 있는 단일봉 보다는 봉 내부를 비우고 냉각수가 흘러갈 수 있도록 한 형태가 더 효과가 있었다. 봉집합체 형태는 압력용기 진 범위에 걸쳐 감소효과가 뛰어났지만 플루언스의 최대값을 떨어뜨리는 데에는 패드 형태 보다 좋지 않은 결과를 나타냈다.

처음에 선정된 차폐물질 이외에도 중성자 제거효과를 있다는 Litium-6, Borated SS, Polyethylene, Graphite, Titanium 등의 다른 여러 물질을 사용해 보았으나, 초기에 선정했던 SS-304와 Tantalum을 제외한 다른 물질은 별다른 효과를 나타내지 못했다.⁽⁶⁾ 그 물질들은 특정에너지 혹은 저에너지 영역에서만 효과가 있기 때문에 원자로 내부와 같은 연속 스펙트럼, 특히 우리가 관심있는 고에너지 영역의 중성자 차폐에는 효과가 없는 것으로 판단된다.

6. 최적 추가차폐체 및 수명연장 효과

고리 1호기 노심 외곽구조물에 위치별로 여러 가지 형태와 재질의 추가차폐체를 설치하고 그 효과를 분석해 본 결과 압력용기 용접부위에서의 속중성자 감소에 가장 효과가 뛰어난 최적 추가차폐체 모델을 도출하였다. 이는 Baffle, Barrel, Thermal Shield의 바깥 면에 각각 두께 1.43cm, 1.9cm, 1.8cm로 Tantalum 단일 패드를 부분 설치한 경우로 그림 5와 6에 원주방향 및 축방향 설치 모습을 나타내었다. 그림 7에는 기존 노심과 함께 최적 추가차폐체 설치 노심의 결과를 나타냈는 데, 기존 노심에 비해 조사량의 최대 부위가 상당히 떨어진 것을 알 수 있다. $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 부분에서는 39%, 전체에서는 19%의 감소효과를 나타냈다. 그림 8에는 최적 추가차폐체 설치 후의 압력용기 내부 깊이별 속중성자 조사량은 나타내었다.

과기처 고시 제 92-20호 원자로 압력용기 감시시험기준에 의하면 고리 1호기와 같이 원주방향의 용접부위인 경우 압력용기 내벽에서의 가압열충격(RT_{PTS}) 값이 300°F 이하가 되도록 규정하고 있다.⁽⁷⁾ 이 기준값에 다다르게 되는 압력용기 내벽에서의 총 누적 플루언스 값은 $3.07 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 이다.⁽⁵⁾ 전력연구원과 한국전력 기술주식회사가 1997년에 발표한 논문을 참고로 기준을 설정하여 기존 노심 및 최적차폐체 설치 노심에 대한 원자로 가동연수별 누적 플루언스 양 및 RT_{PTS} 계산결과를 표 1과 2에 나타냈다.⁽⁸⁾ 기존 노심의 경우 21.8 EFPY (2007년, 27년)의 수명을 가진 것으로 나타났으며, 최적 차폐체 설치 노심의 경우 26.2 EFPY (2013년, 33년)로 4.6 EFPY의 수명연장 효과가 있는 것으로 나타났다.

7. 차폐체 설치후의 열수력학적 영향 평가

압력용기의 중성자 조사량 감소를 위해 최적 추가차폐체를 노심 외곽에 설치할 경우 설치되는 패드는 필연적으로 냉각수의 유로를 차단하게 되어 노심 전체의 열수력학적 측면에 영향을 주게 된다. 그러나 본 연구에서 제안한 추가차폐체 모델을 Baffle-Barrel 사이와 Bypass 등의 우회 유로에 설치할 시에는 우회 유량을

감소시키기 되므로 노심 유효 유량은 그만큼 증가하게 되고, 증가된 유량은 DNBR 값을 크게 하는 긍정적인 결과를 가져온다. 또한, 제안된 구조 변경은 핵연료집합체 외부에서 이루어지기 때문에 우회 유량의 변화는 보수적으로 최대 1.4 %를 넘지 않으며 그 영향도 미미할 것으로 예상된다. 실제 원자로 압력용기 설계사양에 의하면 노심 Shroud로의 우회 유량을 가능한 줄이도록 규정하고 있다. 이 외의 열수력학적 영향인 Baffle-Barrel 사이의 온도상승, 추가 압력강하에 의한 RCS 펌프 부하 증가 등은 원자로의 운전이나 안전성 측면에서 거의 무시할 수 있는 것으로 판단되었다.

8. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 국내 상용로중 가장 노후된 고리 1호기 원자로심을 대상으로 압력용기의 수명연장을 위해 노심 외곽구조물에 추가차폐체를 설치하고 속중성자 조사량을 감소시킬 수 있는 최적 방안에 대해 검토하였다. 노심 외곽의 모든 위치에 다양한 형태와 재질의 추가차폐체를 설치한 후 비교 분석을 통해 최적 차폐체를 도출하였으며, 그 결과 기존 노심과 비교해 4.6 EFPY의 수명연장 효과를 얻어냈다.

노심 외곽으로 누출되는 속중성자의 가장 큰 선원은 노심 외곽 핵연료집합체이기 때문에 작은 변화로도 큰 효과를 예상할 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 향후 연구에서는, 노심 외곽구조물에 추가차폐체 설치에 더하여 외곽 핵연료집합체 변경을 통하여 속중성자 감소효과를 극대화시키는 연구가 수행될 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학공동연구소 원자력안전연구센터의 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김종오, “몬테칼로 모사에 의한 원자로 압력용기의 중성자 플루언스 평가,” 박사학위 논문, 한양대학교, 1997.
2. 김종경 외 “고리 1호기 수명연장을 위한 압력용기 중성자 조사량 감소방안,” 한국원자력학회 ‘98춘계논문집, 1998.
3. 김종경 외, “원자로 압력용기의 수명연장을 위한 중성자 조사량 감소방안 연구,” EESRI 96-중-3, 기초전력공학공동연구소, 1998.
4. “RSIC Computer Code Collection : MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A,” LA-12625, Los Alamos National Laboratory, 1993.
5. 홍준화 외, “고리 1호기 원자로 압력용기 건전성 평가,” KAERI/CR-005/94, 한국원자력연구소, 1994.
6. Noriyoshi Nakanishi, et al., “Calculated Shielding Characteristics of Eight Materials for Neutrons and Secondary Photons Produced by Monoenergetic Source Neutrons with Energies less than 400 MeV,” Nuclear Technology, 1995.
7. 과학기술처, “원자로 압력용기 감시시험기준,” 과학기술처 고시 제 92-20호, 1992.
8. IAEA Specialist Meeting on Pressurized Thermal Shock, Hungary, May 1997 : KOPEC and KEPCO
9. “Investigating the Flux-Reduction Option in Reactor-Vessel Integrity,” EPRI NP-3110-SR, 1983.

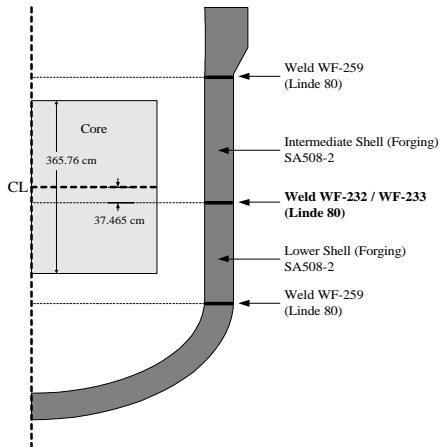


그림 1 고리 1호기 압력용기

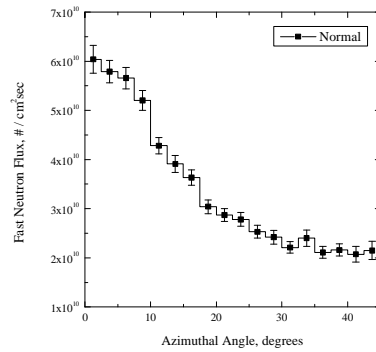


그림 2 기존 노심의 압력용기 내벽 용접부
위에서의 중성자 조사량 계산 결과

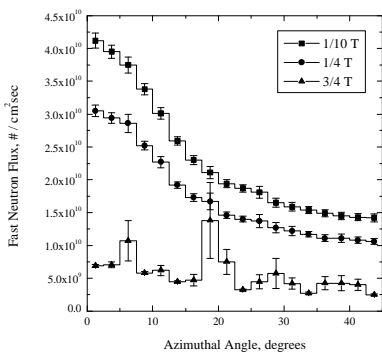


그림 3 기존 노심의 압력용기 내부 깊이별
중성자 조사량 계산 결과

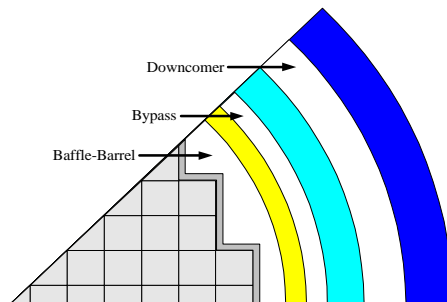


그림 4 추가차폐체를 설치할 수 있는 노
심 외곽 공간

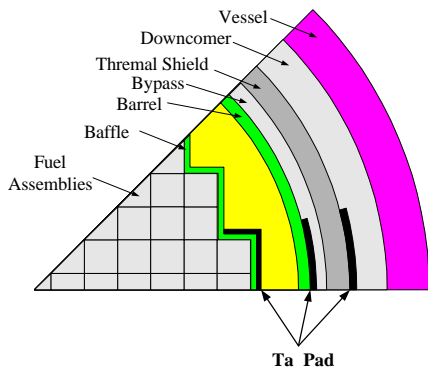


그림 5 선정된 최적 차폐체의 원주방향
기하학적 모습

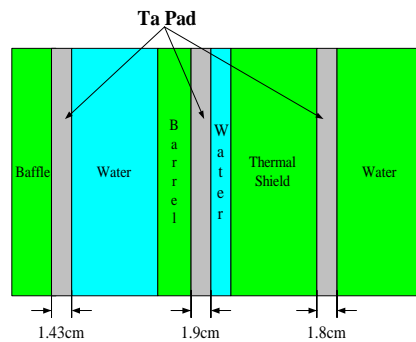


그림 6 선정된 최적 차폐체의 축방향
기하학적 모습

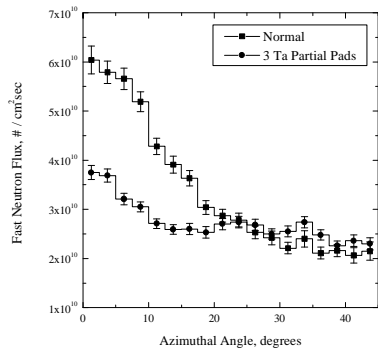


그림 7 기존 노심과 최적차폐체 설치 노심의 중성자 조사량 비교

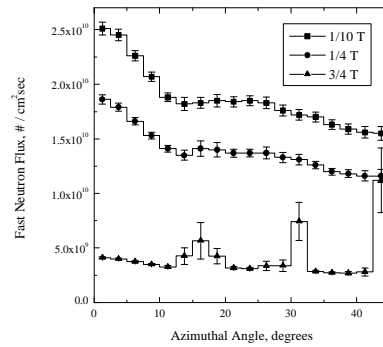


그림 8 최적차폐체 설치노심의 압력용기 깊이별 중성자 조사량 계산 결과

표 1 기존 노심의 누적 플루언스 및 RT_{PTS}

EFPY	Operating Year (Calendar Year)	ID Fluence 10 ¹⁹ n/cm ²	RT _{PTS} °F
11.5*	14.4 (1994)	1.35	258.4
14.6*	18.3 (1998)	1.70	270.6
21.8	27.3 (2007)	3.07	300.0
24.0	30.0 (2010)	3.49	305.9
32.0	40.0 (2020)	5.01	320.9

*: 한국원자력연구소 자료

표 2 최적차폐체 설치 노심의 누적 플루언스 및 RT_{PTS}

EFPY	Operating Year (Calendar Year)	ID Fluence 10 ¹⁹ n/cm ²	RT _{PTS} °F
11.5*	14.4 (1994)	1.35	258.4
14.6*	18.3 (1998)	1.70	270.6
24.0	30.0 (2010)	2.81	295.9
26.2	32.8 (2013)	3.07	300.0
32.0	40.0 (2020)	3.76	309.2

*: 한국원자력연구소 자료