2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

LEPRICON 코드체계를 이용한 국내 원전 선량분석

Dosimetry Analysis for Domestic Nuclear Power Plants Using LEPRICON Code System

문복자, 김용일, 이명훈, 황해룡

한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

LEPRICON 코드체계를 이용하여 국내 원전에서 인출된 14개 시편함을 대상으로 선량분석을 수행하였다. LEPRICON 코드체계를 이용한 선량분석은 DORT/ELXSIR 체계를 이용한 중성자 수송계산과 LEPRICON을 이용한 스펙트럼 전개 계산으로 이루어진다. LEPRICON은 코드 자체에 이미 많은 실험로 자료와 불확실도 인자를 포함하고 있어 분석하려는 원자로와 관련된 최소한의 정보를 추가하는 것으로 최적화된 압력용기 피폭량과 불확실도 계산이 가능하다. 데이터베이스간의 상관관계를 통해 조절된 시편 반응률은 조절 전보다 측정값과 더 잘 일치할 뿐아니라 계산값의 불확실도는 감소하게된다. 형태가 서로 다른 고리 1 ~ 4호기에서 인출된 감시시편에 대한 선량분석 결과, 압력용기 속중성자 누적량은 조절계산전보다 1~4%감소된 결과를 보이는데, 이는 원자로 형태에 상관없이 일관된 경향을 나타내었다. 시편의 반응률 불확실도는 조절전보다 1/4 정도로 감소하였고 압력용기 속중성자 누적량 불확실도는 2.5% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The dosimetry analyses for 14 surveillance capsules extracted from domestic nuclear power plants were carried out using LEPRICON code system. The dosimetry analysis through LEPRICON code system consists of neutron transport calculations using DORT/ELXSIR system and spectral unfolding calculations using LEPRICON. As the benchmark database and covariance of the data have been established in LEPRICON, the best-estimated exposure parameters at vessel and their uncertainties can be calculated by providing minimal amount of additional information related to particular reactors to be analyzed. The adjusted capsule activities show improved agreement with the measured data and reduced uncertainties through the correlation among the database.

As a result of the dosimetry analyses performed for the capsules extracted from Kori 1 ~ 4 plants which have different geometries, the vessel fluences show lower results by 1~4% compared to unadjusted estimates and the analyses show consistent trends through all reactors. The uncertainties in capsule activities were reduced by a quarter and the uncertainties in vessel fluence were reduced by 2.5% compared to unadjusted results.

1. 서론

원자로 압력용기 재료의 조사 취화에 따른 건전성 저하의 정량적 평가에 필요한 피폭량의 정확한 예측을 위해 감시시험 시 원자로 용기 내에 설치된 시편을 인출하여 선량 분석을 하게 된다. 선량 분석은 인출된 선량 시편에 포함된 각 감시자의 측정된 방사능과 압력용기 피폭량 간의 상관 관계를 분석하여 최적화된 피폭량을 예측하고 각 피폭량의 불확실도를 결정하는 것이다.

최근 국내에서 수행되는 감시시험 과정 중 행해지는 선량 분석에서는 FERRET을 이용하여 선량계의 중성자 스펙트럼을 조절하고 조절 전·후 계산값의 비를 압력용기에서 계산된 피폭량과 결합하여 최종 피폭량을 결정한다[1,2]. FERRET 계산은 측정값과의 차이를 최소로 하도록 최소자승법에 의해 스펙트럼을 조절하는 계산으로 조절 과정에서 시편 중성자속에 대한 불확실도만이 평가되고 실제 수송 계산에 사용된 여러 입력의 불확실도에 의한 압력용기 피폭변수의 불확실도 계산을 위해서는 별도의 민감도 분석을 수행해야 한다. 하지만 이 계산에서 채택하고 있는 LEPRICON 방법[3]은 시편의 측정값을 이용하여 계산에 필요한 각 미분인자를 조절하고 각 미분인자의 피폭량에 대한 민감도를 이용하여 원하는 위치에서의 피폭량과 불확실도를 계산하는 방법이다. 또한 여러 가지 벤치마크 실험의 해석 결과를 데이터베이스화하고 있어 이들을 감시시험 결과와 결합하여 분석할 수 있고 핵자료 관련 미분인자와 그 외 계산 과정상 포함될 수 있는 여러 가지 bias 인자, 그리고 민감도 인자를 포함하고 있어 불확실도 계산이 용이하다.

현재까지 국내에서 인출된 시편을 대상으로 한 선량분석은 주로 단일 원자로의 감시시험을 대상으로 하고 있어 다른 형태의 원자로에 대한 선량분석 결과와의 일관성 파악을 위한 시도는 없었다. 따라서 이 보고서는 현재까지 국내에서 수행된 감시시험 중 고리 1 ~ 4호기에서 인출된 14개 시편함을 대상으로 같은 방법을 적용하여 선량분석을 수행하였다. 현재까지 감시시험이 수행된 원자로는 이 외에 영광 1, 2호기, 울진1, 2 호기가 있으나 이들 원자로는 고리 3,4호기와 그 구조가 거의 일치하므로 고리 1 ~ 4호기는 지금까지 감시시험이 수행된 모든 형태의 원자로를 나타낸다.

LEPRICON 코드체계를 이용한 선량분석은 코드 자체에 포함된 다군핵단면적 자료인 ELXSIR 라이브러리를 이용한 DORT 수송계산[4]과 LEPRICON을 이용한 측정반응률과의 조절계산으로 이루어진다. 이 논문은 2 절에서 국내 가동원전의 감시시편 인출 현황과 DORT 수송계산에 의한 중성자속 분포와 반응률 계산에 대해 설명하였고 계산된 반응률을 측정값과 비교하였다. 그리고 3절에는 LEPRICON 조절계산과 조절계산 전·후 불확실도에 대해 살펴 보았다. 수송 계산과 조절계산 결과를 4절에 요약하였고 5절에 결론을 제시하였다.

2. 중성자속 수송계산

2.1 국내 가동원전의 감시시편 인출 현황

표 1은 현재까지 국내에서 감시시험이 수행된 가압경수로의 감시시편 인출시기를 보여준다. 감시시험 일정은 10CFR50, Appendix H[5]에 의해 ASTM E185[6]에 따라 정해지는데 발전소 설계 단계에서 적절한 인출 시기가 예측되고 선량 분석 결과에 따라 다음 시편 인출 시점이 최종 결정된다. 표 1을 볼 때 고리 1호기의 경우 운전 초기 압력용기에 조사된 중성자 누적량이 커 8차 핵주기말까지 4회의 감시시험이 수행되었고 나머지 원자로의 경우는 1주기, 4주기, 8주기 말에 1, 2, 3차 감시시험이 수행되었다. 지금까지 감시시험이 수행된 원자로의 경우 시편함이 중성자 패드 바깥면에 설치된 반면 아직 감시시험이 수행된 적이 없는 영광 3, 4호기, 울진 3, 4호기 등은 압력용기 내벽에 시편함이 설치되어 있어 6 EFPY 운전 후 1차 감시시험이 수행될 예정이다. 이 보고서에서는 표 1의 원자로 중 고리 1, 2호기 1 ~ 4차 감시시험, 고리 3, 4호기 1 ~ 3차 감시시험을 대상으로 전체 14회 감시시험에 대한 선량분석을 수행하였다.

2.2 3차원 중성자속 계산

시편 및 압력용기의 중성자속 분포를 계산하기 위하여 각분할 코드인 DORT를 사용하였다. DORT 계산에 필요한 거시핵단면적 계산을 위해 원자로를 구성하는 각 구조물의 구성 핵종 수밀도를 계산하였다. 원자로 구조물의 구성 핵종 수밀도 중 노심은 균질화된 상태를 가정하여 계산하였고 그 외 구조물은 밀도와 구성비를 이용하여 계산하였다. LEPRICON을 이용한 압력용기 중성자속 조절계산을 위하여 미시핵단면적은 다군핵단면적자료인 ELXSIR 라이브러리를 이용하였다. 계산에 사용된 ELXSIR 라이브러리의 산란핵단면적은 P_3 전개를 사용하였고 기존의 철 핵단면적이 중성자 누설을 과소 평가한다는 지적에 따라[7] 개선된 철 핵단면적 자료를 이용하여 계산을 수행하였다.

수송계산을 위한 중성자 선원 분포는 노심의 상대 출력 분포, 분열 스펙트럼, 노심 열출력 등에 의하여 결정된다. 이 중 노심의 상대 출력분포는 집합체 상대 출력과 규격화된 핵연료봉 출력분포로 구분할 수 있고 노심 내 중성자 선원의 규격화된 공간 분포를 결정한다. 시편의 반응률이나 압력용기 피폭량의 95% 이상은 노심 외곽 집합체의 출력으로 결정되므로[8] 배플에 인접한 외곽 집합체 출력 구배만을 계산에 반영하였고 그 외 노심 내부 집합체는 집합체 출력으로 균일한 핵연료봉 출력분포를 적용하였다. 집합체 상대 출력의 경우 발전소에서 입수한 INCORE 측정 자료 또는 핵설계 보고서로부터 시편이 조사된 기간 동안의 주기별 출력 분포를 사용하였다. 집합체 내부 출력 분포를 나타내는 핵연료봉 출력분포는 노심 추적 계산으로 구한 외곽 집합체 내 출력 분포의 여러 가지 형태를 분석해 본 결과 장전된 위치에 따라 일정한 형태를 보임을 알 수 있었다[8]. 따라서 이 계산에서는 외곽 집합체의 위치에 따라 3가지 형태로 분류된 일반화된 출력 형태를 적용하였는데 일반화된 출력 형태와 연소 계산으로 구한 출력 형태를 이용하여 계산한 시편의 반응률이나 압력용기 피폭량의 차이는 4% 이내로 분석되었다. 계산된 노심 내 상대 출력 분포는 DORT r-θ 수송계산을 위하여 각 핵연료봉의 r-θ 격자에서의 면적분율을 이용하여 r-θ 격자에서의 출력 분포로 전환하였다.

중성자 선원의 공간 분포는 노심 열출력을 이용하여 단위 체적당 중성자 수로 환산하게 되는데 연소에 의한 ^{239}Pu의 증가에 따른 영향을 고려하기 위해 연소에 의한 핵분열 핵종의 구성비와 핵적 특성을 이용하여 연소 효과를 계산하였다. 에너지 별 중성자 분포는 핵분열성 핵종의 분열 스펙트럼을 이용하는데 분열 스펙트럼은 ^{235}U에 비해 ^{239}Pu가 더 경화되어 있으므로 연소에 따라 압력용기 중성자 누적량은 증가한다. 하지만 스펙트럼의 경화가 계산 결과에 미치는 영향은 크지 않아 고리 1 ~ 4호기 선량분석 시에는 ^{235}U 분열 스펙트럼을 이용하여 계산하였다.

노심의 축 방향 출력 분포는 운전 상황에 따라 변화 정도가 심한데 본 논문에서는 외곽집합체

의 축 방향 출력 분포 측정값의 평균값을 사용하였다. 노심의 축 방향 출력 분포를 이용한 r-z 계산과 1차원 ANISN 계산을 통한 시편에서의 축 방향 보정인자는 축 방향 중심 위치에서 1.08 ~ 1.12로 계산되었다.

중성자 수송 계산을 위한 원자로 모델은 노심과 배플, 배럴, 물, 압력용기 등과 콘크리이트 차폐체를 포함한다. 전방 계산에 의한 3차원 중성자속은 r-θ 방향 중성자속 분포와 r-z 방향 중성자속 분포 그리고 ANISN으로 계산된 r 방향 1차원 중성자속 분포를 합성하여 계산하였다. 그림 1에 고리 2호기의 r-θ 방향 중성자속 분포 계산을 위한 축 방향 중심 위치에서의 원자로 구성을 보였다. 압력용기의 피폭량 계산을 위한 격자 구성은 압력용기를 잘 묘사하기 위해 r-θ 격자 구조를 이용하는데 노심 외곽은 격자 간격을 조밀하게 하여 격자구조와 실제 구조물의 구조 차이에서 오는 영향을 줄이고 외곽 집합체의 출력 구배도 적절히 묘사될 수 있게 하였다. r-z 계산 시 배플은 정확한 구조를 알 수 없어 집합체에 인접한 판만을 고려하였다. 2차원 및 1차원 중성자속의 합성으로 계산된 3차원 중성자속은 시편의 조사 기간동안 평균 출력 분포를 이용, 100% 출력을 가정하여 계산하였다. 표 2는 이러한 중성자속 계산에 근거한 시편의 반응률을 나타낸다.

2.3 시편 반응률 측정값과 계산값

여러 주기 동안 원자로 내에서 조사된 후 인출되는 시편의 반응률은 시편이 조사된 기간의 출력 분포 변화를 고려하여 계산하여야 하는데 주기별 출력분포의 변화에 따른 반응률 차이를 알아보기 위해 수반 계산으로 구한 수반중성자속과 주기별 출력분포를 이용하여 그 영향을 계산하였다. 표 3에 수반 계산을 이용한 각 주기별 $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$ 선량계 반응률을 전체 주기 평균에 대한 상대적 비로 나타내었는데 주기 별 반응률이 전체 평균에 비하여 20% 이상 큰 결과를 보이는 경우도 있어 반응률 계산 시 출력 분포의 변화에 의한 영향도 적지 않음을 알 수 있다. 이러한 차이는 시편에 인접한 외곽 핵연료집합체의 상대 출력에 의존하는데 신연료가 장전되는 경우는 중성자 누설이 커 반응률도 증가하고 여러번 연소된 집합체가 장전되는 경우는 반응률이 작다.

감시시편의 선량분석을 위해 측정값과 계산값을 비교할 때 측정된 비방사능은 시편이 조사된 기간동안의 출력변화가 이미 반영된 값이므로 반응률 계산값은 다음 식을 통해 노심의 연소이력을 반영하여 시편 인출 시점(TOR;Time of Removal)에서의 값을 계산하였다.

$$A^{d'}_{TOR} \cong \frac{\overline{r_{d'}}}{r_d} \times \sum_j C_j \sum_g c_{g,j} \int_{\text{octant}} S_j(R,q) f^*_{g,d}(R,q) RdRdq \times \sum_i \frac{P_i}{P_{ref}} \{1-\exp(-l_d t_i)\} \exp(l_d T_i) \times K ,$$

여기서,

$\overline{r_{d'}}$ = 전체 조사기간의 평균 출력을 사용하여 계산한 d' 감시자의 3차원 반응률,

r_d = 전체 조사기간의 평균 출력을 사용하여 r-θ 전방모드로 계산한 d 감시자의 반응률,

C_j = j 주기의 출력 대 중성자 전환 인자,

S_j = j 주기의 중성자 선원분포,

f^* = 수반 중성자속 분포,

P_i = 조사기간 i 동안의 평균 노심 출력,

P_{ref} = 원자로 기준(100%) 출력,

t_i = 조사기간 i의 조사 시간,

l_d = d 감시자의 붕괴상수,

T_i = 조사기간 i 에서 시편 인출까지의 시간,

K = 전방계산 및 수반 계산에 의한 반응률 비이다.

표 4에 이 식으로 계산된 시편 인출 시점의 반응률을 나타내었고 그 결과를 측정반응률과 비교하였다. 이 때 측정반응률은 실험실에서 측정된 비방사능을 인출시점부터 측정시점까지의 붕괴를 고려하여 계산한 값이다. 이 표에서 볼 때 비교적 측정 과정이 간단한 ^{60}Co, ^{54}Mn, ^{58}Co 핵종의 경우는 대부분 측정값과 계산값의 차이가 10% 이내로 큰 차이를 보이지 않으나 ^{238}U과 ^{237}Np과 같은 분열 시편은 계산값과의 차이가 심하고 일관된 특성도 보이지 않아 일부 측정은 분석 시 제외하였다.

자유도 당 χ^2는 측정 및 계산값의 차이를 이들의 결합된 표준편차에 대해 나타낸 값으로, 제공된 측정값들을 이용한 조절계산이 타당한 결과를 주는지를 알 수 있는 척도이다. 즉 조절계산이 의미 있는 결과를 주기 위해서는 이 값이 1.0에 근접한 값을 가져야 하는데 LEPRICON 계산에서는 0.8 1.2 영역에 들어가는 경우 조절계산을 의미있는 것으로 판단한다. 따라서 이 계산에서는 LEPRICON이 갖고 있는 다른 벤치마크 실험과의 결합을 통해 자유도당 χ^2값이 타당한 영역에 들어가는 실험 군 중 대상 실험이 가장 많은 경우를 최종값으로 선택하였다. 하지만 조절계산에 적용한 측정의 종류에 따라 계산 결과는 다소 달라지게 되므로 측정 과정을 분석하여 신뢰도가 만족되는 측정값들을 조절계산 시 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3. 중성자속 조절

3.1 LEPRICON 계산

LEPRICON 은 중성자 스펙트럼 전개(spectral unfolding) 방법을 적용하여 가압경수로 원자로 압력용기에서의 중성자 스펙트럼 계산값에 대한 불확실도를 정량화하고 또한 그 불확실도를 감소시키기 위한 코드 체계이다. LEPRICON 은 시편에서 측정된 반응률과 계산된 반응률, 그리고 측정 및 계산값의 불확실도를 입력으로, 최소자승법을 이용한 여러 벤치마크 실험 데이터와의 결합을 통해 미분 인자를 최적화함으로써 압력용기에 조사되는 최적 평가된 중성자속을 구하고 이렇게 평가된 중성자속의 불확실도는 계산 불확실도에 비해 감소된 값을 갖는다.

압력용기에 조사되는 최적 중성자 누적량과 그 불확실도를 구하기 위한 조절계산은 두 단계로 이루어진다. 우선 시편에서 측정된 반응률과 계산된 반응률, 불확실도 인자 등을 LEPRICON 이 갖고 있는 벤치마크 데이터와 결합하여 측정된 반응률과 계산된 반응률의 차이가 최소가 되도록 미분 인자나 보정 인자 그리고 bias 인자를 조절한다. 그리고 이렇게 조절된 인자들을 이용하여 시편 및 압력용기에서의 중성자 스펙트럼을 계산하고 계산된 중성자 스펙트럼으로부터 속중성자속이나 DPA 등과 같은 피폭변수와 그 불확실도를 계산하는 것이다.

선량계 반응률과 압력용기 중성자속 조절계산은 대상 원자로에서 측정된 값과 LEPRICON에 데이터베이스로 포함된 37개 벤치마크 실험을 결합하여 이루어진다[9,10]. 현재까지 국내에서 인출된 선량계는 7종의 핵반응 감시자로 이루어져 있는데 이 중 속중성자 누적량 조절에 기여하는 5종의 핵반응 감시자를 대상으로 조절계산을 수행하였다. 하지만 이미 살펴본 바와 같이 많은 선량분석 실험에서 핵분열 시편에 대한 측정은 거의 이루어지지 않았고 측정값 중 다른 실험과의 일관성이 적은 측정 결과도 많아 실제로는 2 5종 핵반응에 대한 측정값을 벤치마크 실험과 결합하여 조절계산을 수행하였다.

표 5에 각 원자로의 감시시험 시 인출된 시편을 LEPRICON 방법으로 조절한 결과를 측정값과 비교하여 나타내었다. 표 4의 조절 전 계산 결과와 비교할 때 전체적으로 조절계산에 의해 계산값이

측정값과 더 잘 일치하는 결과를 보인다. 그리고 조절계산 시 적용한 측정 자료와 계산 자료를 이용하여 계산된 자유도당 χ^2 값도 나타내었는데 모두 0.8~1.2영역에 들어 있음을 확인할 수 있다. 이 결과를 볼 때 조절계산에 사용된 측정값들이 계산값과 비교하여 일관된 경향을 보일 때 측정값과 더 잘 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있다.

3.2 조절 전·후 불확실도 계산

수송 계산으로 구한 중성자속과 반응률 계산값의 불확실도에 영향을 미치는 인자로는 철 구조물 구성 핵종의 비탄성산란단면적과 핵분열 스펙트럼 그리고 시편의 핵반응단면적과 같은 핵자료 관련 부분과 수송 계산 과정의 계산 방법, 모델링, 물질 조성 등에 의한 불확실도를 고려할 수 있다. 이러한 미분인자의 불확실도는 민감도 행렬과 결합하여 선량계의 반응률이나 압력용기 중성자 스펙트럼의 불확실도로 전파된다. 선량계나 압력용기에서의 중성자속 계산값의 불확실도를 나타내는 공분산은 여러 미분인자의 공분산을 결합하여 계산되고 측정값과 관련된 여러 인자와의 상관 관계에 의해 조절계산 후 그 값이 감소함을 알 수 있다.

조절계산에서는 중성자 스펙트럼에 대한 불확실도 인자이외에 시편 반응률의 측정값과 계산값에 대한 불확실도 인자도 공분산 형태로 나타내어야 하는데 측정 반응률의 불확실도는 측정시스템에 따라 적용되는 인자가 달라질 수 있다. 현재까지 국내에서 인출된 시편의 선량분석을 위한 감시자의 비방사능 측정은 여러 기관에서 수행되었는데 현재 불확실도와 관련하여 이용할 수 있는 자료는 측정방사능의 통계적 불확실도로 이는 일반적으로 1% 정도로 가정할 수 있는 값으로[11, 12] 불확실도 계산 인자 중 중요도가 크지 않은 인자이다. 따라서 국내에서 인출된 시편의 선량분석에 적절한 불확실도 인자를 파악할 수 없어 LEPRICON 계산에서 일반적인 측정시스템에 적용되는 불확실도 인자를 사용하여 분산 및 공분산 행렬을 계산하였다. 시편의 반응률 계산값에 대한 불확실도는 반응률의 핵반응단면적에 대한 민감도, 반응단면적의 공분산, 그리고 계산된 중성자속의 공분산 등을 이용하여 계산한다. 측정 반응률 공분산 행렬과 계산 반응률 공분산 행렬을 비교하면 계산 반응률의 표준편차는 측정 반응률의 표준편차보다 크고 상관 관계도 더 크다. 이는 각 감시자의 반응률 계산값은 같은 입력 조건으로 계산된 중성자속을 이용하여 계산되므로 선량계에 따라 다른 측정 인자가 적용되는 측정값에 비해 상호 연관 정도가 크기 때문이다. 조절계산 후 반응률의 공분산을 살펴 보면 각 반응률의 표준 편차는 계산 및 측정 반응률의 표준편차에 비해 감소하는 결과를 보이고 상관 관계는 측정 반응률에 비해 증가하고 계산 반응률에 비해 감소하는 결과를 보였다.

4. 계산 결과

LEPRICON 코드체계를 이용한 선량분석은 다군핵단면적 자료인 ELXSIR 라이브러리를 이용한 DORT 수송계산과 LEPRICON을 이용한 측정반응률과의 조절계산으로 이루어진다. 조절계산은 LEPRICON 계산이 요구하는 일관성을 만족하는 한 모든 측정값을 이용하여 수행하였다. 표 4에 DORT/ELXSIR 수송계산 결과를 보였는데 분열시편을 제외하면 대부분 계산이 측정값과 큰 차이를 보이지 않았다.

LEPRICON을 이용하여 측정값과 계산값의 차이가 최소가 되도록 미분인자를 조절하고 조절된 미분인자에 대한 피폭량의 민감도를 이용하여 시편 반응률과 압력용기 속중성자 누적량을 계산하였다. 표 5에 조절된 반응률과 측정값의 비를 보였는데 표 4의 조절전 계산값과 비교할 때 측정값

과의 차이가 줄어들었음을 알 수 있다. 표 6에는 조절 전·후 압력용기 속중성자 누적량을 나타내었는데 14회 감시 시험 모두 조절계산에 의해 압력용기 속중성자 누적량이 1~4%감소했음을 알 수 있다. 이는 DORT/ELXSIR 체계를 이용한 수송계산이 측정값과 비교할 때 약간 크게 평가되어 있었음을 의미한다. 하지만 불확실도가 약 13%이므로 조절계산에 의한 누적량의 변화는 크지 않다. 이는 DORT/ELXSIR 계산이 측정값을 잘 예측하였기 때문에 나타난 결과이다.

조절계산으로 시편 반응률이나 압력용기 피폭량의 불확실도가 감소하는데 시편 반응률의 불확실도는 조절계산 전에 비하여 1/4이상 감소하였고 표 6에서 압력용기 속중성자 누적량은 약 2.5% 정도 감소함을 볼 수 있다. 압력용기 속중성자 누적량의 불확실도가 시편 반응률의 불확실도에 비해 감소 정도가 작은 것은 시편에서의 측정값이 조절계산에 사용되었기 때문이다.

5. 결론

DORT/ELXSIR 체계를 이용하여 고리 1 ~ 4호기의 14회 감시시험 시 인출된 시편을 대상으로 선량분석을 수행하였다. 시편에서의 반응률 측정값과 계산값, 불확실도 인자를 이용한 LEPRICON 계산을 통해 조절된 미분인자로부터 압력용기에서의 중성자 스펙트럼과 그 불확실도를 계산하였다. 고리 1 ~ 4호기 원자로는 압력용기 내부 구조물과 노심 형태가 서로 상이한 원자로로 계산 방법의 타당성을 확인하기 위하여 다른 형태 원자로들을 대상으로 같은 방법을 적용하여 분석하였다.

고리 1~4호기를 대상으로 LEPRIOCN 코드체계를 적용, 선량 분석을 수행한 결과 수송 계산에 의한 반응률은 많은 감시자에 대하여 10% 이내로 측정값과 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 수송계산 결과를 측정값과 비교하여 조절하는 과정에서 미분인자와 압력용기 피폭량과의 상관관계를 이용하여 최적화된 압력용기 피폭량을 계산하였고 각 미분인자의 불확실도와 각 피폭량과의 민감도 등을 이용하여 불확실도를 계산하였다. 조절계산 후 압력용기에서의 1 MeV 이상 속중성자 누적량은 조절계산 전 보다 1~4%감소된 값을 보였고 불확실도는 15.3~15.6%에서 13.0~13.1%로 약 2.5% 정도 감소한 결과를 나타내었다. 원자로 형태에 상관없이 압력용기 속중성자 누적량의 조절 정도나 불확실도 감소 정도는 일관된 경향을 보였다. 조절계산에 의한 시편 반응률은 조절 전에 비하여 측정값과 더 잘 일치하는 결과를 보였으며 불확실도는 약 20%에서 약 5% 로 1/4이상 감소하는 결과를 나타내었다.

LEPRICON 코드체계를 이용한 선량 분석의 장점은 코드 자체에 포함된 많은 벤치마크 실험 자료와 불확실도 자료를 활용하여 압력용기 피폭량의 불확실도 계산이 용이하고 측정값과의 결합을 통해 조절 후 계산값의 불확실도가 조절전에 비해 감소하며 측정값과도 더 잘 일치하는 결과를 제공한다는 것이다. 실제 국내 운전 중인 여러 원자로의 감시시험을 대상으로 LEPRICON 코드체계를 적용한 선량분석 결과 국내 원자로의 선량분석에도 훌륭히 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. "고리원자력 1호기 원자로 압력용기재료 조사취화 재평가 최종보고서," KAERI-ST-K1-001/98, 한국원자력연구소, 1998.
2. "고리원자력 2호기 원자로 압력용기재료 제 4차 감시시험(감시용기 T)," KAERI-ST-K2-003/97, 한국원자력연구소, 1997.
3. R. E. Maerker, et al., "RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, LEPRICON," PSR-277, ORNL, Jun. 1995.

4. "DOORS3.1: One-, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code System," CCC-650, RSICC, ORNL, 1996.
5. Code of Federal Regulations, 10CFR Part 50, Appendix H, “Reactor Vessel Material Surveillance Program Requirements.”
6. ASTM E185-98, “Standard Practice for Conducting Surveillance Tests for Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels, E706(IF),” American Society for Testing and Materials, 1998.
7. Draft Regulatory Guide DG-1053, “Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence,” US NRC, 1998.
8. B. J. Moon, "Generalized Spatial Source Distributions for Dosimetry Analysis," to be issued.
9. R. E. Maerker, et al., "Development and Demonstration of an Advanced Methodology for LWR Dosimetry Application," NP-2188, EPRI.
10. R. E. Maerker, et al., "Revision and Expansion of the Data Base in the LEPRICON Dosimetry Methodology," NP-3841, EPRI.
11. R. E. Maerker, et al., "Application of the LEPRICON Unfolding Procedure to the Arkansas Nuclear One-Unit 1 Reactor," Nucl. Sci. Eng., Vol. 93, 137-170, 1986.
12. R. E. Maerker, et al., "LEPRICON Analysis of Pressure Vessel Surveillance Dosimetry Inserted into H. B. Robinson-2 During Cycle 9," Nucl. Sci. Eng., Vol. 96, 263-289, 1987.

감사의 글

이 연구는 한국전력공사에서 지원하는 고도화사업 중 <방사선 및 임계안전해석 최적화 기술개발> 과제의 일환으로 수행되었으며 고리원자력발전소 측정자료, 원자력연구소 감시시험 자료, 한전원자력연료주식회사 노심 출력 자료를 제공해주신 여러분께 감사드립니다.

표 1. 감시시험이 수행된 국내 가압 경수로

원자로	운전개시일*, dd-mm-yy	노심 열출력, MWth	감시시편 인출일, dd-mm-yy (조사기간, EFPD)				
			1차	2차	3차	4차	5차
고리 1	08-19-77	1723.5	1 주기말 10-27-79 (411)	5 주기말 07-07-84 (1566)	6 주기말 08-14-85 (1855)	8 주기말 01-15-88 (2515)	15 주기말 03-30-97 (4964)
고리 2	04-22-83	1876	1 주기말 05-24-84 (280)	4 주기말 08-18-87 (1186)	8 주기말 05-30-92 (2654)	12 주기말 02-18-97 (4120)	-
고리 3	01-02-85	2775	1 주기말 07-05-86 (326)	4 주기말 11-03-89 (1244)	8 주기말 03-07-94 (2499)	-	-
고리 4	11-11-85	2775	1 주기말 03-01-87 (325)	4 주기말 05-13-90 (1199)	8 주기말 12-08-94 (2550)	-	-
영광 1	02-01-86	2775	1 주기말 07-08-87 (336)	4 주기말 08-16-90 (1204)	8 주기말 03-21-95 (2624)	-	-
영광 2	10-16-86	2775	1 주기말 03-13-88 (336)	4 주기말 02-24-91 (1125)	8 주기말 08-28-95 (2533)	-	-
울진 1	03-01-88	2775	1 주기말 02-22-92 (998)	4 주기말 03-23-95 (1951)	8 주기말 10-02-97 (2759)	-	-
울진 2	03-29-89	2775	1 주기말 11-01-92 (956)	4 주기말 12-10-95 (1927)	8 주기말 08-23-98 (2752)	-	-

* 1차 핵주기 시작 시점

표 2. 각 원자로에 대한 전방 수송 계산 결과(3차원, 전출력 반응률)

원자로	핵반응	시편의 반응률(rps/nucleus)			
		1 차	2 차	3 차	4 차
고리 1	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	6.06E-17	5.03E-17	4.27E-17	6.18E-17
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	8.32E-15	6.24E-15	5.45E-15	8.42E-15
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	9.28E-15	6.92E-15	6.02E-15	9.39E-15
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	4.32E-14	2.98E-14	2.65E-14	4.35E-14
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	4.19E-13	2.63E-13	2.39E-13	4.20E-13
고리 2	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	5.48E-17	5.14E-17	5.00E-17	4.94E-17
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	6.16E-15	5.70E-15	5.40E-15	5.33E-15
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	8.54E-15	7.89E-15	7.42E-15	7.32E-15
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	3.63E-14	3.33E-14	3.00E-14	2.96E-14
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	4.34E-13	3.93E-13	3.33E-13	3.27E-13
고리 3	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	9.14E-17	8.22E-17	8.24E-17	-
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	1.03E-14	9.11E-15	9.11E-15	
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	1.42E-14	1.25E-14	1.25E-14	
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	5.82E-14	5.04E-14	5.03E-14	
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	6.31E-13	5.35E-13	5.34E-13	
고리 4	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	9.14E-17	8.34E-17	8.45E-17	-
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	1.03E-14	9.26E-15	9.38E-15	
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	1.42E-14	1.27E-14	1.29E-14	
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	5.81E-14	5.14E-14	5.20E-14	
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	6.30E-13	5.47E-13	5.54E-13	

표 3. 각 원자로의 주기별 반응률($^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$) 비

주기	주기별 반응률/ 평균 반응률								
	고리 1호기			고리 2호기		고리 3호기		고리 4호기	
	13도 시편	23도 시편	33도 시편	19도[1] 시편	22도 시편	17도 시편	20도 시편	17도 시편	20도 시편
1 주기	1.06[2]	0.98	1.00	1.13	1.12	1.14	1.11	1.10	1.09
2 주기	1.23	1.15	1.13	1.01	1.00	0.97	0.98	1.03	1.03
3 주기	1.21	1.10	1.04	1.03	1.03	0.98	0.99	0.85	0.85
4 주기	1.25	1.21	1.26	1.00	1.01	0.91	0.92	0.97	1.00
5 주기	1.10	1.02	1.02	1.00	0.99	0.92	0.93	1.03	1.01
6 주기	0.91	0.94	0.97	1.06	1.01	1.07	1.07	0.94	0.97
7 주기	0.96	0.93	0.89	0.98	0.99	0.99	0.99	1.07	1.06
8 주기	0.85	0.94	0.93	0.94	0.94	1.02	1.01	1.00	1.00
9 주기	0.97	1.05	1.02	0.94	0.98	-	-	-	-
10 주기	0.90	0.90	0.93	1.12	1.11	-	-	-	-
11 주기	0.86	1.00	1.08	0.88	0.89	-	-	-	-
12 주기	0.87	0.93	0.96	0.90	0.91	-	-	-	-
13 주기	0.95	0.95	0.92	-	-	-	-	-	-
14 주기	0.94	0.95	0.93	-	-	-	-	-	-
15 주기	0.96	0.95	0.92	-	-	-	-	-	-

1) 시편의 방위각(그림 1 참조)

2) (고리 1호기 방위각 13도 위치 시편의 1주기 출력 분포를 이용한 반응률)/(고리 1호기 방위각 13도 위치 시편의 1주기 15주기 출력 분포를 이용한 반응률의 평균값)

표 4. 시편 인출 시점의 계산 반응률 및 측정 반응률과의 비

원자로	핵반응	TOR activity(rps/nucleus)				계산값/측정값			
		1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차
고리 1	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	8.07E-18	1.95E-17	1.84E-17	3.09E-17	0.88	0.97	1.00	0.92
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	4.25E-15	4.67E-15	4.01E-15	5.79E-15	1.01	1.08	1.02	1.08
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	7.29E-15	5.81E-15	5.04E-15	6.98E-15	1.08	1.09	1.06	0.87
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.10E-15	2.71E-15	2.84E-15	6.09E-15	1.22	1.33	1.23	-
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.07E-14	2.39E-14	2.55E-14	5.89E-14	1.03	1.28	2.36	-
고리 2	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	5.19E-18	1.68E-17	2.83E-17	3.42E-17	0.93	1.18	0.95	0.88
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	2.67E-15	4.41E-15	4.62E-15	4.49E-15	1.02	1.14	1.07	1.10
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	6.81E-15	7.05E-15	6.72E-15	6.51E-15	1.04	1.13	1.00	1.13
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	6.32E-16	2.36E-15	4.52E-15	6.57E-15	0.51	0.97	-	0.59
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	7.55E-15	2.79E-14	5.01E-14	7.27E-14	0.51	1.28	-	0.89
고리 3	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	1.00E-17	2.79E-17	4.48E-17		1.08	0.94	1.05	
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	5.12E-15	6.86E-15	8.07E-15		1.05	1.09	1.09	
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	1.28E-14	1.06E-14	1.21E-14		1.14	1.10	1.06	
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.18E-15	3.75E-15	7.19E-15		0.98	-	-	
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.28E-14	3.98E-14	7.62E-14		1.39	-	-	
고리 4	$^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$	9.99E-18	2.75E-17	4.71E-17		0.98	1.04	0.66	
	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$	5.04E-15	6.90E-15	8.46E-15		0.96	1.10	1.05	
	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	1.19E-14	1.07E-14	1.19E-14		1.06	1.11	1.11	
	$^{238}U(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.17E-15	3.70E-15	7.60E-15		1.55	-	-	
	$^{237}Np(n,f)^{137}Cs(cd)$	1.27E-14	3.95E-14	8.09E-14		1.57	-	-	

표 5. 조절 후 계산 반응률과 측정값의 비(시편 인출 시점)

원자로	감시시험	χ^2/I	시편 반응률의 계산값/측정값				
			Cu	Fe	Ni	U	Np
고리 1호기	1차	1.06	0.89	0.98	1.05	-	1.00
	2차	1.14	0.89	0.95	0.96	1.15	1.07
	3차	1.07	0.94	0.93	0.97	1.12	-
	4차	1.01	0.92	1.04	-	-	-
고리 2호기	1차	0.95	0.94	1.01	1.04	-	-
	2차	0.94	1.03	1.02	1.03	0.92	-
	3차	0.96	0.95	1.04	0.99	-	-
	4차	1.17	0.89	1.05	1.09	-	0.91
고리 3호기	1차	0.98	1.00	0.97	1.06	0.95	-
	2차	0.99	0.91	1.02	1.04	-	-
	3차	0.90	0.99	1.02	1.00	-	-
고리 4호기	1차	1.02	0.97	0.95	1.04	-	-
	2차	0.92	0.97	1.01	1.03	-	-
	3차	0.97	-	0.97	1.03	-	-

표 6. 조절 전·후 압력용기 속중성자 누적량과 표준편차의 비교

원자로	감시시험	1.0 MeV 이상 중성자속 누적량(n/cm^2)		표준편차(%)	
		조절전	조절후	조절전	조절후
고리 1호기	1차	1.655×10^{18}	1.644×10^{18}	15.60	13.09
	2차	6.219×10^{18}	6.010×10^{18}	15.60	13.03
	3차	7.765×10^{18}	7.582×10^{18}	15.60	13.09
	4차	9.922×10^{18}	9.775×10^{18}	15.60	13.10
고리 2호기	1차	1.288×10^{18}	1.279×10^{18}	15.44	12.98
	2차	4.817×10^{18}	4.626×10^{18}	15.44	12.96
	3차	1.078×10^{19}	1.068×10^{19}	15.44	12.97
	4차	1.606×10^{19}	1.564×10^{19}	15.44	12.96
고리 3호기	1차	1.837×10^{18}	1.787×10^{18}	15.28	12.95
	2차	5.068×10^{18}	4.992×10^{18}	15.28	12.95
	3차	1.039×10^{19}	1.016×10^{19}	15.28	12.95
고리 4호기	1차	1.823×10^{18}	1.806×10^{18}	15.28	12.96
	2차	5.201×10^{18}	5.071×10^{18}	15.28	12.95
	3차	1.159×10^{19}	1.130×10^{19}	15.28	12.98

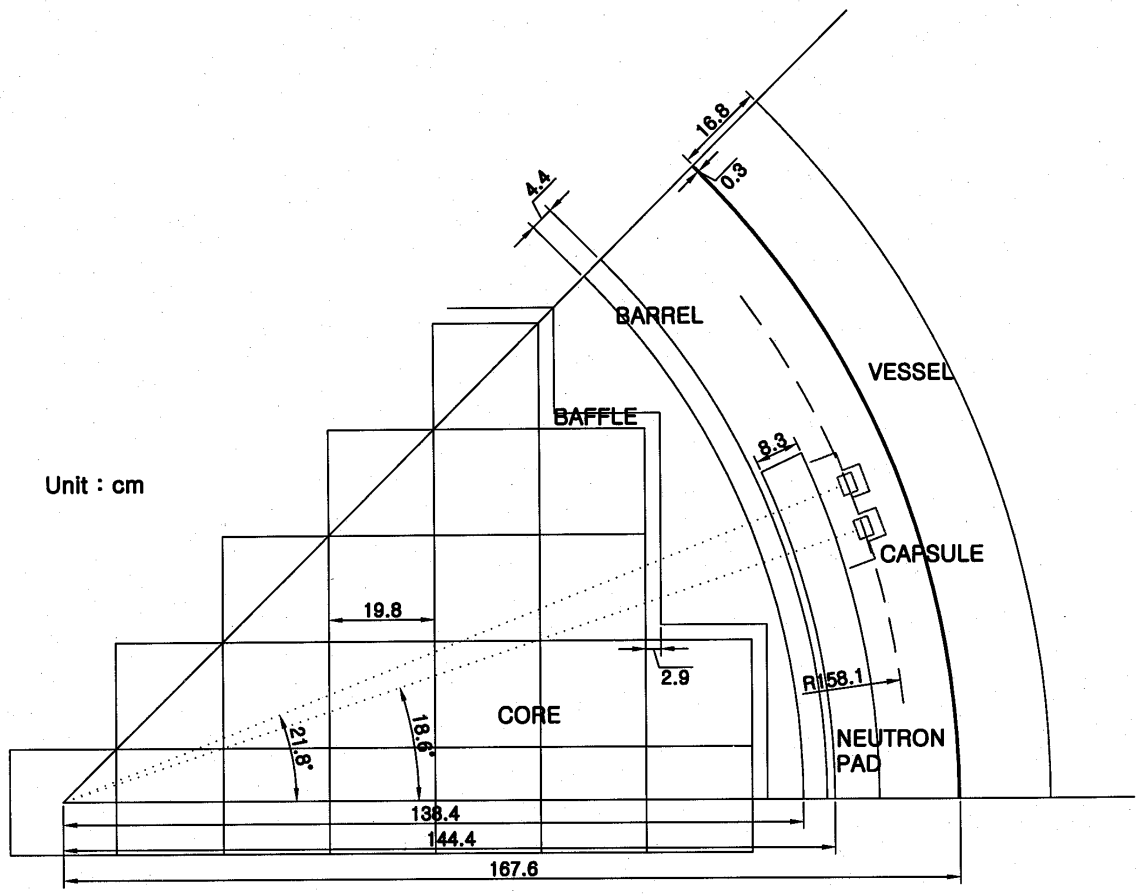

그림 1. 축 방향 중심 위치에서의 원자로 구조(고리 2호기)