

노외계측기 반응도 계산에서의 2 차원 DORT 합성법과 3 차원 TORT 계산 비교

Comparison of 2-D DORT Synthesis with 3-D TORT in the Calculation of
Excure Detector Response

김강석, 송재승, 지성균
한국원자력연구소
305-333 대전시 유성구 덕진동 150

배성만
한전전력연구원
305-380 대전시 유성구 문지동 103-16

요약

동적제어봉가 측정방법은 노외계측기 반응도 평가시 노외계측기의 핵연료집합체 격자에 대한 3 차원 가중치를 필요로 한다. 3 차원 가중치는 제어봉의 변화에 따른 과도상태시의 격자별 중성자 밀도와 곱하여 적분하여 노외계측기의 반응도 계산에 사용되는데 이는 3 차원 수반중성자 방정식의 해로부터 구한다. 3 차원 수반중성자속은 2 차원 S_N 수송계산 코드인 DORT 합성계산 또는 3 차원 코드인 TORT 를 이용하여 구할 수 있으나, 3 차원 TORT 계산은 결과의 정확성에 비하여 지나치게 과도한 계산 시간을 필요로 하는 단점이 있다. 따라서 DORT 합성법과 TORT 계산의 결과를 비교하여 DORT 합성법이 동적제어봉가 측정에서 표준 절차로 타당한지 분석하였다. 영광 3호기 6 주기를 대상으로 제 5 제어군의 변화에 따른 중간 노외계측기의 반응도비를 비교해본 결과 DORT 합성법이 TORT 와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Abstract

The method of Dynamic Rod Worth Measurement (DRWM) requires the three dimensional mesh-wise weighting factors to the excure detector in evaluating its response. Three-dimensional mesh-wise weighting factors are used to obtain the excure detector response by multiplying them by the fission neutron density from the transient calculation due to the rod position change. These factors can be obtained from the solution of three-dimensional adjoint transport equation. DORT, two-dimensional S_N transport code, synthesis method and TORT, three-dimensional S_N transport code can be used for the adjoint flux. Since TORT requires very time consuming calculation, we showed if DORT synthesis method could replace TORT as a standard procedure in the DRWM. We applied the weighting factors from two methods to YGN-3 cycle-6 Bank-5. We showed that there was well agreement between two methods in the excure detector response ratios.

I. 서론

가동중인 국내의 가압경수로 및 개발중인 SMART 노심의 차폐계산 및 노외계측기의 반응도 계산 등은 Oak Ridge National Lab.에서 개발한 2차원 각분할 중성자/감마 수송 코드인 DORT^[1]를 사용하고 있다. 차폐계산 및 노외계측기의 반응도 계산은 3차원 수송계산을 수행하여야 하나 3차원 계산의 과도한 계산시간 및 전산기 용량의 한계로 인하여 두개의 2차원계산을 합성하는 방법을 일반적으로 사용하여 왔다. 현재까지 알려진 바에 의하면 축방향 노심의 불균질성이 거의 없거나 길이가 긴 경우에는 축방향의 중성자속의 변화가 크지않아 두개의 2차원 계산을 합성하여 3차원 노심을 묘사하는 방법이 비교적 문제가 없다. 그러나 축방향의 불균질성이 커지거나 길이가 짧아 축방향의 출력 및 중성자속이 급격하게 변하는 경우에는 2차원합성이 유효할지는 알려져 있지 않다. 뿐만 아니라 기존의 검증된 계산 이외의 새로운 기술개발에서 2차원 합성법을 지속적으로 사용하기 위하여서는 검증계산이 필요하고 만약에 타당하지 않을 경우에는 3차원 계산을 직접 수행하여야 한다.

가압경수로 노물리 시험의 제어봉가 측정에서 기존의 과도한 시간이 소요되는 측정방법의 대안으로 주목 받고 있는 동적제어봉가 측정 (DRWM; Dynamic Rod Worth Measurement) 에서는 노외계측기에 대한 핵연료집합체 격자별 3차원 가중치를 필요로 한다. 이러한 노외계측기에 대한 가중치는 기존의 2차원 DORT 합성법 또는 3차원 각분할 중성자/감마 수송 코드인 TORT^[3]를 이용하여 수반중성자속 계산을 수행한다. 가압경수로를 대상으로 하는 3차원 수송계산은 2차원합성계산에 비하여 정확한 결과를 가져오기는 하나 여전히 과도한 계산시간을 요구하므로 2차원계산 결과와 거의 차이가 없다면 계산시간에서 효율적인 2차원합성 방법을 사용하는 것이 합리적이다. 반대로 계산결과에서 큰 차이가 보여진다면 3차원 수송계산이 표준절차로 정립되어야 할 것이다.

실험용 원자로인 VENUS-3를 대상으로 Cartesian 좌표계에서 선량계에 대한 2차원 DORT 합성법과 3차원 TORT 수송계산은 잘 일치된 결과를 보여준다.^[4] VENUS-3 노심의 경우 가압경수로에 비하여 크기가 상당히 작으며 축방향 불균질성이 크지만 2차원 합성법이 선량계의 반응도에서 3차원 계산과 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 동적제어봉가 측정을 위한 예로 EPRC에서 McGuire 원자로를 대상으로 원통좌표계에서 DORT 합성법 및 TORT의 노외계측기에 대한 수반중성자속 계산을 수행하였다.^[5] 계산결과는 수반중성속의 분포는 상당한 차이를 보여주나 노외계측기의 반응도비는 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 이때 사용된 격자의 수는 $92 \times 44 \times 17$ (r, θ, z)로 전체적인 기하적 구조로 보아 축방향 격자의 수가 지나치게 작은 것이 정확도에서 문제를 유발할 여지가 있으나 2차원합성법과 3차원계산이 거의 일치하는 반응도비를 보여주었다.

본 연구에서는 국내의 가동중인 가압경수로의 동적제어봉가 측정실험을 위하여 필요한 핵연료집합체의 격자별 가중치 계산하는 표준 계산절차를 정립할 목적으로 DORT 계산을 통한 2차원 합성법과 3차원 TORT 계산을 비교 분석하였다. 2차원 합성법은 계산소요 시간이 짧고 모델링 또한 간단하므로 비교적 정확한 노외계측기의 반응도비를 제공한다면 표준계산절차로 타당하므로 본

연구를 통하여 이를 검증하고자 한다. 분석계산을 통하여 문제점이 발견된다면 3차원 수반 중성자 계산을 표준 절차로 확립하여야 할 것이다.

2장에서는 노외계측기에 대한 수반중성자 계산의 의미와 이를 통한 노외계측기의 반응도를 계산하는 방법과 동적제어봉가 측정에서 사용되는 제어봉의 위치에 따른 반응도비 계산에 대하여 알아보았다. 3장에서는 계산절차 및 계산에 사용된 값, 그리고 계산내용 등에 대하여 알아 보았다. 4장에서는 계산결과를 나타내었고, 5장에서는 결론 및 향후과제에 대하여 알아보았다.

II. 이론

중성자 수송방정식을 연산자와 벡터를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}\Psi = \mathbf{Q}. \quad (1)$$

위의 식에서 \mathbf{H} 는 수송연산자이고 Ψ 는 방향의존중성자속, 그리고 \mathbf{Q} 는 선원을 나타낸다. 이 중성자 수송방정식을 수반방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{H}^+\Psi^+ = \sum_{tot}^{detector}. \quad (2)$$

위의 식에서 \mathbf{H}^+ 는 수반 수송연산자, Ψ^+ 는 수반 방향의존중성자속, 그리고 $\sum_{tot}^{detector}$ 는 계측기의 거시전단면적을 나타낸다. 위의 두식으로부터 적절한 계산을 통하여 계측기의 반응도 (\mathbf{R})를 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$\mathbf{R} = \int dE dV d\Omega \Psi^+ \mathbf{Q}. \quad (3)$$

위의 식에서 \mathbf{Q} 는 임의의 값으로 등방성의 단일점 핵분열 선원으로 다음과 같이 가정할 수가 있다.

$$\mathbf{Q}(\vec{r}, \Omega, E) = \frac{1}{4\pi} x(E) \delta(\vec{r} - \vec{r}_i). \quad (4)$$

위의 식에서 $x(E)$ 는 핵분열 중성자의 스펙트럼이고, $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$ 는 Dirac의 델타함수이다. 따라서 식 (3)과 (4)로부터 위치 \vec{r}_i 에서 단일점 핵분열 선원에 대한 노외계측기의 반응도는 다음과 같다.

$$\mathbf{R}(\vec{r}_i) = \frac{1}{4\pi} \int dE x(E) \Phi^+(\vec{r}_i, E). \quad (5)$$

위의 식에서 Φ^+ 는 수반 스칼라 중성자속이다.

집합체 격자별 가중치는 각 핵연료집합체의 격자에 대한 노외계측기의 반응도를 규격화한 것으로 수반중성자 수송계산을 통하여 수반 스칼라 중성자속을 계산할 수 있다. 위의 식을 핵연료가 장전되어 있는 어떤 특정한 격자에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ijk} = \frac{\int_{V_{ijk}} dV R(\vec{r})}{\int_{V_{ijk}} dV}. \quad (6)$$

위의 식에서 (i,j,k)는 Cartesian 좌표계의 격자점을 나타낸다. 위의 식을 이용하여 핵연료가 장전되어 있는 전체 격자에 대한 규격화된 가중치를 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$W_{ijk} = \frac{R_{ijk}}{\sum_{i,j,k} R_{ijk}}. \quad (7)$$

이렇게 결정된 격자의 가중치로부터 DRWM에서 제어봉의 위치변화에 따른 노외계측기의 반응도를 계산할 수 있다. 이 계산을 위해서는 노심의 동적계산에서 제어봉의 위치 변화에 따라 구해진 핵분열 중성자 밀도 분포가 필요하다. 이를 사용한 노외계측기의 제어봉위치 'n'에 따른 반응도는 다음과 같다.

$$R_n^{detector} = \sum_{i,j,k} W_{ijk} \cdot S_{ijk,n} \cdot \Delta V_{ijk}. \quad (8)$$

각 제어군을 완전 삽입 상태에서 인출시키는 방향으로 진행하면서 노외계측기의 반응도의 변화를 비로 측정한다. 따라서 그 비를 반응도비라 정의하고 다음과 같이 나타낸다.

$$Response\ ratio = \frac{R_n^{detector}}{R_{ARI}^{detector}}. \quad (9)$$

DORT는 2차원의 (r, θ)와 (r, z) 수송계산이 가능한데 이 계산으로부터 3차원의 값을 다음식을 이용하여 합성할 수 있다.

$$\Phi^+(r, \theta, z) = \frac{\Phi^+(r, \theta) \cdot \Phi^+(r, z)}{\Phi^+(r)}. \quad (10)$$

위의 식에서 $\Phi^+(r)$ 은 $\Phi^+(r, \theta)$ 또는 $\Phi^+(r, z)$ 로부터 각각 θ 방향 또는 z 방향으로 적분하여 구할 수 있다.

III. 계산

본 계산에서는 원통좌표계에서 DORT 및 TORT 수반중성자 수송계산을 수행하였다. 2차원 DORT의 경우 축방향 불균질성을 무시하는 (r, θ) 좌표계와 방위각에 따른 불균질성을 무시하는 (r, z)좌표계에 대하여 각각 계산을 수행하였다. 계산 시 각분할은 S_8 Level symmetry를 사용하였고 비등방성산란의 경우 P_5 까지의 Legendre 차수를 사용하였다. 격자수는 (r, θ)의 경우 82x54, (r, z)의 경우 91x68을 사용하였다. 사용된 중성자 및 감마 라이브러리는 Oak Ridge National Lab.에서 제공하는 47군 중성자 및 20군 감마의 BUGLE-96^[7]을 사용하였다. BUGLE-96 라이브러리와 GIP 코드^[8]를 이용하여 원자로의 각 구성물질의 거시단면적을 구하여 DORT 계산에서 사용하였다. 모델링은 반경방향으로 원자로의 cavity wall까지 하였다.

TORT 계산 시 각분할은 S_8 Level symmetry, 비등방성산란의 경우 P_5 까지의 Legendre 차수를 사용하였다. 격자수는 (r, θ , z) 방향에 대하여 82x54x68을 사용하였다. 사용된 단면적은 DORT 계산의 경우와 동일한 것을 사용하였다. 모델링은 DORT와 차이가 나지 않도록 일치 시켰다.

노외계측기에 대한 수반중성자 계산을 수행하여 수반중성자속을 계산하고 식 (5)를 이용하여 각 격자의 핵분열 선원에 대한 노외계측기의 반응도를 계산하였다. DRWM의 노심계산에서 사용되는 격자구조는 Cartesian 기하구조 이므로 원통좌표계의 격자별 반응도를 노심계산에서 격자 구조에 맞게 재구성하였다. 여기에서는 가중치 계산에서 (r, θ) 방향의 경우 중심이 Cartesian 좌표계의 격자에

포함되는 경우, 해당 격자에서의 가중치 계산에 포함시켰다. 축방향의 경우는 Cartesian 기하구조와 동일하므로 노심계산의 축방향 격자 구조에 맞게 가중계산을 하여 값을 구하였다.

본 연구에서는 영광 3 호기 6 주기 노심을 대상으로 제 5 제어군의 위치 변화에 따른 노외계측기의 반응도비를 계산하였다. 실제의 DRWM 계산에서는 과도계산으로부터 구한 핵분열중성자의 격자별 밀도분포가 사용되거나 자료가 준비되어 있지 않은 관계로 제어봉 위치에 따른 정적계산의 출력분포를 대신 사용하였다. 과도상태에서는 제어군의 위치에 따라 전체 중성자의 밀도가 변하지만 여기에서는 규격화된 출력을 사용하므로 중성자밀도가 동일한 것이 된다. 그러나 출력은 국소위치에서의 규격화된 중성자 밀도와 동일하므로 전체적인 경향을 보는 데는 문제가 없다. 출력분포는 노심에 대하여 CASMO-3/MASTER 계산으로부터 구한 3 차원 출력 분포를 사용하였다. 이 계산에서는 평면좌표계에서 핵연료집합체가 1 개의 격자를 형성하고 축방향으로는 24 개의 격자를 형성하도록 모델링하였다. DORT 및 TORT 계산은 266 MHz CPU 및 256 MB Ram 의 SUN Workstation 에서 수행하였다.

IV. 계산결과

두개의 (r, θ) 및 (r, z) DORT 의 계산으로부터 3 차원 원통좌표계의 수반중성자속을 계산하고 핵분열중성자의 스펙트럼을 에너지군별로 곱하여 각 격자의 선원에 대한 중간 노외계측기의 반응도를 계산하였다. TORT 의 경우에도 동일한 계산절차를 거쳐 각 격자의 선원에 대한 노외계측기에 대한 반응도를 계산하였다. DORT 와 TORT 계산결과의 특성을 알아보기 위하여 축방향 그리고 방위각 및 반경방향에 대해 선원에 대한 노외계측기의 반응도를 비교하였다.

축방향 분포를 알아보기 위하여 노외계측기에서 가장 근거리로 핵연료가 위치하는 $(r=34, \theta=25)$ 격자에서 축방향의 반응도 분포를 체적가중계산을 통하여 규격화 하여 비교하였다. 계산의 결과는 그림 1 에 나타나 있는데 DORT 의 계산결과는 노심의 중간 부분에서 값을 낮게 예측하고 상단과 하단 부분에서 높게 예측하는 형태를 보여준다. 이러한 양상은 DORT 계산을 통한 격자별 가중치 계산에서 노심의 중간부분에 낮은 값을 보여주게 되어 중간부분에 오차를 가져올 것을 예상할 수 있다. 그림 2 는 노외계측기에서 가장 근거리로 핵연료가 위치하는 $(\theta=25, z=34)$ 격자위치에서 체적가중계산을 통하여 규격화된 반경 방향 노외계측기 반응도 분포를 비교 한 것이다. 이 경우 노외계측기에 가까운 위치에 접근할수록 TORT 계산결과에 비해 DORT 계산결과가 낮게 예측함을 알 수 있다. 그림 3 은 핵연료집합체가 장전되어 있는 경계면인 $(r=30, z=34)$ 격자위치에서 방위각방향의 규격화된 노외계측기 반응도를 나타낸 것이다. 가장 큰 반응도를 보여주는 위치는 노외계측기가 위치하고 있는 방위각 방향이다. 이 경우 역시 노외계측기와 가까운 위치에서는 DORT 의 계산결과가 낮은 값을 보여주고 먼 위치에서는 높은 값을 보여주고 있다.

계산결과로부터 핵연료가 존재하는 격자에 대한 노외계측기 반응도를 노심계산에서 사용되는 핵연료 집합체에 대한 Cartesian 격자구조에 대하여 체적가중 및 규격화를 통하여 핵연료집합체 격자별 가중치를 계산하였다. 가중계산에서는 축방향으로 24 개의 격자와 평면좌표계에서는 그림 4 에서 보여지는 25 개의 격자 즉 25x24 개의 격자가 가중계산에 포함되었다. 그림 4 에 12 번째 축방향

격자에 대하여 DORT 및 TORT 계산으로부터 구한 가중치를 비교하였다. 그림에서 보여주는 바와 같이 계측기에 가까운 위치에서 TORT 계산의 가중치가 훨씬 큰 값을 보여주고 내부 또는 거리가 멀어질수록 작은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다

이상에서 보여진 바와 같이 DORT의 계산으로부터 구한 수반중성자속 또는 노외계측기 반응도는 노외계측기의 위치에서 가까운 거리에서는 과소 평가를 하고 먼 거리에서는 과대 평가를 하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 2차원의 계산에서는 산란반응을 제대로 묘사하지 못하는 까닭에 산란으로 인한 에너지의 손실 또는 흡수반응 등을 과소 평가하여 먼 거리에 위치하는 핵연료에 의한 영향이 증가하기 때문인 것으로 추론 할 수 있다.

그러나 실제로 이러한 차이를 보인다 할지라도 이 값들이 노외계측기 신호분석에 절대 값으로 사용되는 것이 아니기 때문에 절대적인 의미를 갖는 것은 아니다. 노외계측기의 경우 계측기의 효율성이 계측기 마다 다르고 계측기의 장전 시간에 따라 그 효율성이 계속 변하기 때문에 항상 정상상태 또는 표준상태에 대한 과도상태 또는 변이상태에 대한 비로 나타낸다.

식 (9)에서 보여주는 바와 같이 DRWM의 경우 특정제어군의 완전 삽입상태 시 노외계측기의 총반응도를 표준으로 하고 제어봉의 인출에 따른 총반응도의 비를 구해 제어봉가 계산에 사용한다. 따라서 격자의 가중치가 큰 차이를 보여준다 할지라도 노외계측기의 반응도비를 정확하게 예측한다면 큰 문제가 되지는 않는다. 실제로 이러한 효과를 알아보기 위하여 영광 3 호기 6 주기를 대상으로 주기초에서 제 5 제어군이 완전삽입상태에 10%씩 인출하면서 계측기의 반응도 비를 계산하여 보았다. 계산결과는 그림 5에 나타나 있는 데 그림에서 보여주는 바와 같이 0.8%이내에 일치하고 있음을 보여주고 있다.

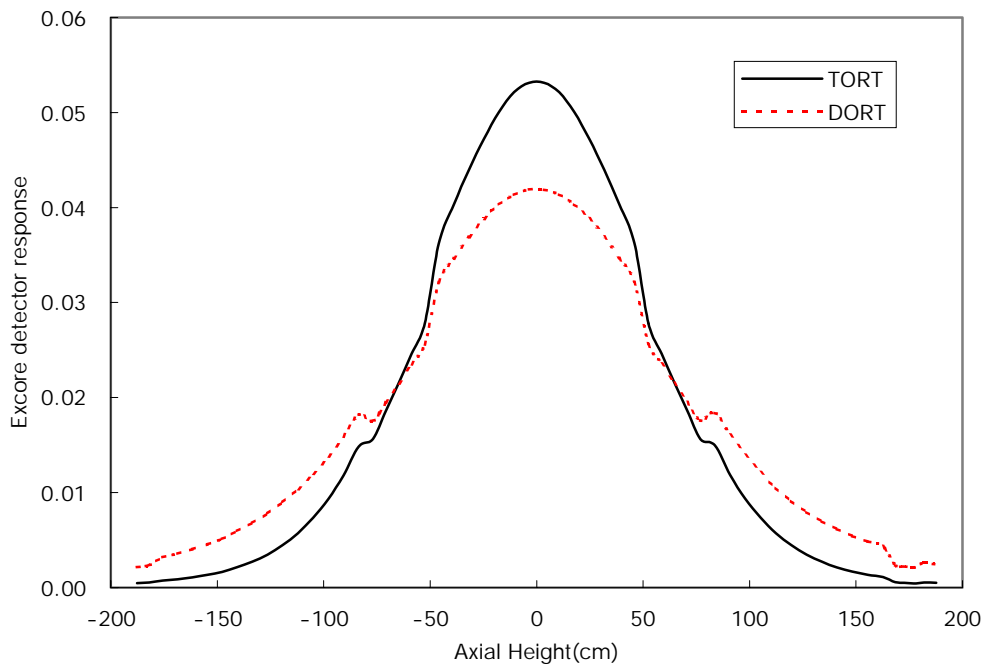


그림 1. 규격화된 축방향 노외계측기 반응도분포 비교 ($r=34, \theta=25$)

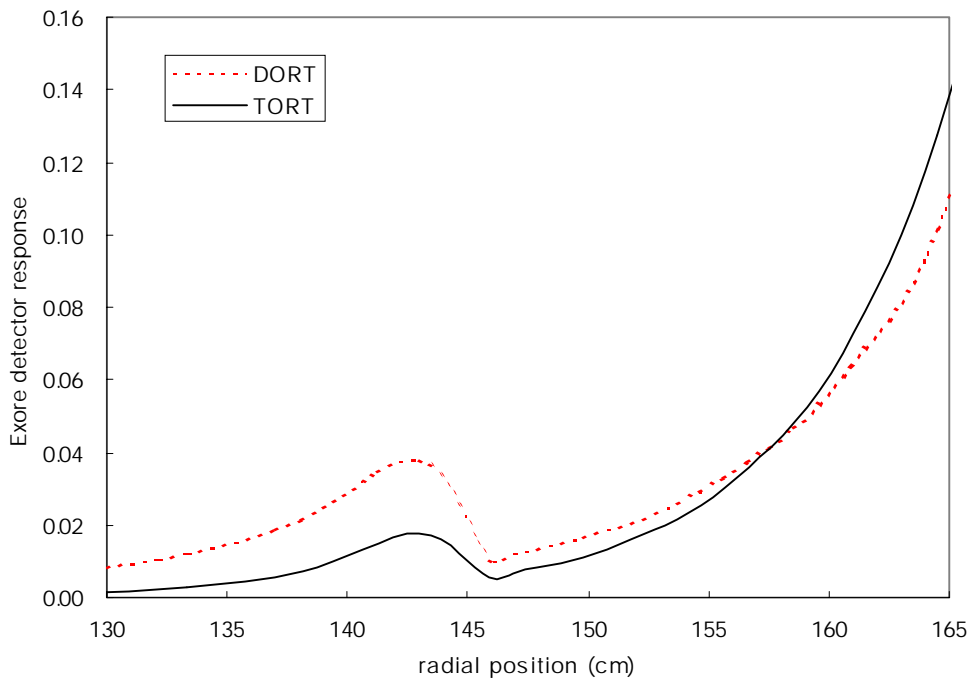


그림 2. 규격화된 반경 방향 노외계측기 반응도분포 비교 ($\theta=25, z=34$)

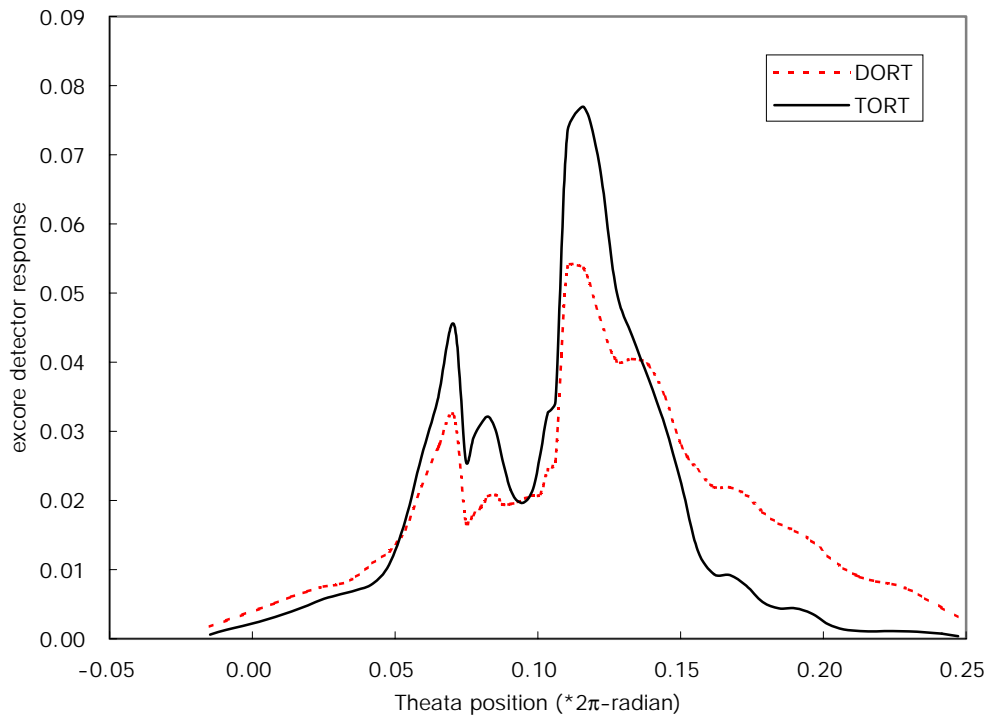


그림 3. 규격화된 θ 방향 노외계측기 반응도분포 비교 ($r=30, z=34$)

표 1. 계산시간 비교

Model	격자수	CPU Time	Real Time
DORT (r, θ)	82x54	6.46 min.	11.73 min.
DORT (r, z)	91x68	11.66 min.	42.66 min.
TORT (r, θ , z)	82x54x68	2227.72 min.	4628.27 min.

표 1은 DORT 및 TORT 계산에 소요된 CPU 시간과 실제시간을 비교한 것이다. 표에서 보여지는 바와 같이 DORT 계산의 경우 2 가지 계산에 실제시간으로 54 분 정도 소요된 반면 TORT 계산의 경우 77 시간이 소요되었다. 노외계측기의 반응도비에서 거의 동일한 결과를 얻는다면 2 차원 DORT 합성계산이 절대적으로 유리할 것으로 판단된다.

V. 결론 및 토의

2 차원의 DORT 의 계산으로부터 합성한 3 차원 수반 중성자속은 3차원 TORT 계산의 수반 중성자속의 분포와는 전체적인 양상에서 상당한 차이를 보여준다. 그러나 DRWM 등에서 사용되는 노외계측기의 반응도 측면에서 살펴보면 표준상태에 대한 변화비가 의미를 가지므로 절대적인 값의 차이에는 민감하지 않다. 두가지 방법으로 구한 핵연료집합체 격자별 가중치를 이용하여 영광 3 호기 6 주기의 제어균위치의 이동에 따른 노외계측기의 반응도 비를 계산해본 결과 0.8%이내에서 잘 일치하고 있음을 보여준다.

이와 같은 결과는 계산시간이 과다하게 소요되는 3 차원의 TORT 계산을 대신하여 2 차원 DORT 계산 합성법이 충분히 사용가능함을 보여주고 있다. 한편 SMART 노심과 같이 작은 규모의 원자로인 경우 축방향으로 길이가 짧고 이질성이 강해 출력분포의 변화가 심하고, 계측기가 원자로 내부에 위치하는 경우 2 차원 DORT 합성법이 3 차원 TORT 를 대신할 수 있을 지는 분석계산을 통하여 가능성을 타진해 보아야 한다.

참고문헌

1. W. A. Rhoades, R. L. Childs, "The DORT One- and Two-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, Oak Ridge Nat'l Lab. (1982)
2. "User's Manual, RAMBO Ver. 1.00 Dynamic Reactivity Measurement of Rod Worth," EPRC, North Carolina State Univ. (2000)
3. W. A. Rhoades, R. L. Childs, "The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code," ORNL-6268, Oak Ridge Nat'l Lab. (1987)
4. Bok Ja Moon et al., "Analysis of the VENUS-3 Benchmark Experiment Using DORT and TORT," Proc. Of the Int. Conf. On the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, New York, USA, 5-8 Oct. 1998, pp. 931-938

5. Donald M. Helton, Jr., "2D/2D/1D Adjoint Flux Synthesis for Determination of the Excore Detector Response in Support of the Dynamic Rod Worth Measurement Method," EPRC Internal Report (1998)
6. E.E. Lewis and W.F. Miller, Jr., "Computational Methods of Neutron Transport," John Wiley & Sons, New York (1984)
7. "BUGLE-96 Coupled Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications," DLC-185, Oak Ridge Nat'l Lab. (1996)
8. W. A. Rhoades, "The GIP Program for Preparation of Group-Organized Cross-Section Libraries," Oak Ridge Nat'l Lab. (1978)