‘2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

단일 격자에 대한 3 차원 연계 노달 전개해 기반의 비선형 소격격자 유한 차분법

Nonlinear Coarse Mesh Finite Difference Method Based on 3D Coupled Nodal Expansion Solution within One-Node Kernel

이기복, 주한규, 조병오, 지성균, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김창효

서울대학교 원자핵공학과
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요약

본 논문은 단일격자 구조를 가진 3 차원 소격 격자 비선형 노달 방법의 해를 구하는 방법으로 횡방향으로 적분된 3 개의 일차원 중성자 확산 방정식을 연계하여 동시에 해를 구하는 방법을 제시한다. 단일격자에서 3 개의 횡방향 적분 일차원 중성자 확산 방정식은 횡방향 누설항에 의해 서로 연계되어 있다. 여기에 경계조건으로 3 차원 각 6 면의 인입 부분중성자류가 주어지면,그 노드의 평균 중성자속과 외행 부분중성자류를 구할 수 있다. 이 방법은 국소적인 내부 경계조건을 갖는 문제나 global-local 반복계산에 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 단일 격자내의 중성자속 분포를 노달 전개법으로 가정하여 이 방법을 유도하여 MASTER 코드에 구현하였다. 이 방법의 정확성과 계산 시간을 검증하기 위하여 NEACRP A1 문제의 정상상태 고유치 문제에 대해 적용한 결과, 노달 전개해와 비선형 쌍격자 노달 전개해와 동일한 해를 보였다.

Abstract

This paper represents a three dimensional nonlinear nodal method to solve the coupled three transverse integrated neutron diffusion equations simultaneously in the one-node kernel. The three transverse integrated neutron diffusion equations are coupled through the transverse leakage terms. Given the incoming partial boundary conditions specified at six node surfaces, the node average fluxes and the surface outgoing currents are solved for at the same time. This method will be useful for the local internal boundary problem or the global-local iteration method. The proposed method is derived representing the intra node neutron distribution with a nodal expansion solution. To verify the accuracy and computing time, it is implied in the MASTER code and tested for the initial steady state of NEACRP A1 problem. The result shows that the same solution with those of the nodal expansion method and nonlinear nodal expansion method.

1. 서론

최근 비선형 노달 방법의 하나로 단일격자에 대한 일차원 노달 방법이 소개되었다. 통상적인 비선형 소격 격자 차분(Coarse Mesh Finite Difference, CMFD)해법은 주로 쌍격자에 대해 격자간 중성자류를 쌍격자의 평균 중성자속에 대한 함수로 기술하여 격자간 연계성을 효과적으로 결정하여 안정적 수렴성을 제공하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 쌍격자 방식은 3차원 문제의 경우 쌍격자를 구성하는 문제의 수가 많고, 왼쪽과 오른쪽 노드와 연계하는 쌍격자 문제를 독립적으로 풀어, 한 격자에 대해 노드내의 중성자속 분포가 유일하게 결정되지 않는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 단일격자 계산방식으로 신호철 등[1]은 비선형 CMFD에 노드내의 2차원 미세격자 유한차분해를 결합하는 방식을 제안하였으며 주한규 등[2]은 노드내의 반경방향 두 개의 일차원 중성자 확산 방정식의 해석해를 연계하여 동시에 풀고 축방향에 대하여 쌍격자 방식을 취하는 방법을 소개하였다. 이 방법들은 효율적인 단일 격자 계산 결과를 보여주나 축방향에 대해 여전히 쌍격자 방식의 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 노드내의 x, y, z 방향에 대해 횡방향으로 적분된 3개의 일차원 확산 방정식을 연계하여 동시에 노달 전개해를 구하는 방법을 제시하고 있다. 경계조건으로 각 면에 대한 부분 인입 중성자류가 사용되고, 해로서 노드 평균 중성자속과 외행 부분 중성자류가 구해지며, 이들은 다음 CMFD 계산에 반복 이용되어 수렴된 해가 구해진다. 이 방법은 한 노드에 대해 3 방향의 횡방향 적분 일차원 해가 서로 연계되어 동시에 구해지므로 유일한 중성자속 분포가 정해지게 된다. 그러므로 내부 경계 조건을 갖는 문제에 용이하게 응용할 수 있다.

다음 2 절에서는 x, y, z 방향으로 이루어진 정방형 단일 격자에 대해 6개 경계면의 부분

인입 중성자류를 경계조건으로 하여 상호 연계된 3 개의 일차원 중성자 확산 방정식의 노달 전개해를 유도한다. 다음 3 절에서는 단일 노드의 노달 전개해를 이용하여 격자간 연계 인자를 결정하는 방법을 기술하고, 제 4 절에서는 본 논문에서 제안한 방법을 NEACRP A1 의 초기 정상 상태 고유치 문제에 적용하여 구한 결과를 기존의 노달 전개법과 쌍격자 방식의 결과와 비교하였다.

2. 3 차원 연계 일차원 노달 해법

3 차원 정방형 노드의 경우 횡방향 적분 기법을 적용하면 x, y, z 방향별로 3 개의 일차원 중성자 확산 방정식이 중성자 누설항에 의해 서로 연계된다. 기존의 단일 격자 해법의 경우, 미리 계산된 횡방향 누설을 사용하여 각 방향에 대한 일차원 중성자 확산 방정식을 독립적으로 풀고 있다. 여기서는 서로 연계된 3 개의 일차원 확산 방전식을 동시에 푸는 단일 격자 노달 해법을 살펴 본다.

2.1 연립 일차원 중성자 확산 방정식

x-y-z 평면에서 횡방향 2 군 중성자 확산 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(u) = -D\frac{d^2}{du^2}f_u(u) + Af_u(u) + L_u(u) = 0 \ . \qquad (1)$$

여기서 계수 행렬은 군정수의 함수로 다음과 같이 정의되고:

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & \\ & D_2 \end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} \Sigma_{r1} - ln\Sigma_{f1} & -ln\Sigma_{f2} \\ -\Sigma_{12} & \Sigma_{r2} \end{bmatrix},\ l = \frac{1}{k_{eff}}\ , \qquad (2)$$

중성자속과 횡방향 누설을 나타내는 벡터는 아래와 같다.

$$f(u) = \begin{bmatrix} f_1(u) \\ f_2(u) \end{bmatrix},\ L_u(u) = \begin{bmatrix} L_{u1}(u) \\ L_{u2}(u) \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

통상적으로 횡방향 노달 방법에서 사용되는 이차함수 횡방향 중성자 누설 근사식을 적용하면, 한 계산 대상 격자에 대해 (1)식의 우변을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_u(u) = \bar{L}_{\bar{u}} + \bar{L}_{\hat{u}} + b_1^u x + b_2^u f_2(x) \quad , \quad x = \frac{u}{h_u}, \quad f_2(x) = 3x^2 - \frac{1}{4}. \qquad (4)$$

여기서, $u \in \{x,y,z\}$, $\begin{cases} if\ \ u = x, then\ \ \bar{u} = y, \hat{u} = z \\ if\ \ u = y, then\ \ \bar{u} = x, \hat{u} = z \\ if\ \ u = z, then\ \ \bar{u} = x, \hat{u} = y \end{cases}$ 이다.

여기서 일차항과 이차항의 계수 b_1^u 와 b_2^u 는 이전 단계의 반복계산에서 미리 알려져 있다고 본다. 방향별 연계를 고려하지 않는 기존의 단일 격자 노달 해법에서는 $\bar{L}_{\bar{u}}$ 와 $\bar{L}_{\hat{u}}$ 도 알려져

있다고 보며, 참고문헌 [2]의 x, y 반경 방향이 연계된 경우는 $\overline{L}_z$ 가 알려져 있다고 간주하나 여기에서는 미지수로 간주한다. 단, u 방향에 대한 누설은 u 방향 일차원 중성자속과 다음과 같은 관계를 만족하여야 한다.

$$\overline{L}_u = \frac{J_u^r - J_u^l}{h_u}, \quad J_u^{r,l} = -D\frac{df_u}{du}\bigg|_{u=\frac{h_u}{2},-\frac{h_u}{2}} \tag{5}$$

(5)식에 의해 x, y, z 방향에 대한 일차원 중성자 확산 방정식은 서로 연계되며, 이들은 아래와 같은 연립 미분 방정식을 형성한다.

$$\begin{aligned}
-D\frac{d^2}{dx^2}f_x(x) + Af_x(x) &= -\frac{J_y^r - J_y^l}{h_y} - \frac{J_z^r - J_z^l}{h_z} + b_1\frac{x}{h_x} + b_2\left(3\frac{x^2}{h_x^2} - \frac{1}{4}\right) \\
-D\frac{d^2}{dy^2}f_y(y) + Af_y(y) &= -\frac{J_x^r - J_x^l}{h_x} - \frac{J_z^r - J_z^l}{h_z} + b_1\frac{y}{h_y} + b_2\left(3\frac{y^2}{h_y^2} - \frac{1}{4}\right). \\
-D\frac{d^2}{dz^2}f_z(z) + Af_z(z) &= -\frac{J_x^r - J_x^l}{h_x} - \frac{J_y^r - J_y^l}{h_y} + b_1\frac{z}{h_z} + b_2\left(3\frac{z^2}{h_z^2} - \frac{1}{4}\right)
\end{aligned} \tag{7}$$

단일 정방형 격자 문제에서 (7)식의 해가 만족해야 할 경계 조건으로 여섯 면에서의 인입 부분 중성자류를 설정하면, (7)식의 해는 유일하게 존재한다. P_1 근사에 따르면 인입 부분 중성자류 경계 조건은 다음과 같다.

$$J_{ul}^{in} = \frac{1}{4}f_u\left(-\frac{h_u}{2}\right) + \frac{1}{2}J_u^l, \quad J_{ur}^{in} = \frac{1}{4}f_u\left(\frac{h_u}{2}\right) - \frac{1}{2}J_u^r \tag{8}$$

2.2 노달 전개해의 구성과 제약 조건

노드내 u 방향 횡방향으로 적분된 일차원 중성자속 분포를 다음과 같은 함수로 전개한다.

$$f_u(u) = \sum_{i=0}^{4} a_{iu} f_i(x), \tag{9}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
f_0(x) &= 1, \\
f_1(x) &= x, \\
f_2(x) &= 3x^2 - \frac{1}{4}, \\
f_3(x) &= x^3 - \frac{1}{4}x, \\
f_4(x) &= x^4 - \frac{3}{10}x^2 + \frac{1}{80} \quad .
\end{aligned}$$

식 (9)의 계수들이 구해야 하는 미지수로 식(7)에서 우변의 중성자 누설항에 의해 서로 연계되어 있다. 이때 상수항은 식(9)를 노드에 대해 적분하면 노드내 평균 중성자속이

되며($a_{0u} = \bar{f}_u$), 육면의 인입 부분중성자류가 주어지면 구할 수 있으므로 여기서는 미지수가 된다. 또한 이 값은 어느 방향에 대해서도 노드 평균 중성자속이 같다는 조건에 의해 각 방향에 대해 동일한 미지수($\bar{f} = \bar{f}_x = \bar{f}_y = \bar{f}_z$)로 간주된다. 따라서 구해야 하는 미지수는 2 군 중성자속의 경우, 노드 평균 중성자속 2 개와 중성자군에 대해(2x), 각 방향별(3x) 나머지 4 개의 계수로 24(=2x4x3)개가 있어 전체 26 개의 미지수가 있게 된다. 이 26 개의 미지수를 결정하기 위해 각 군별로 13 개의 조건이 필요한데, 6 개는 각 여섯면의 인입 중성자류 조건으로 제공되고, 6개는 가중적분법에 의해 제공되고 나머지 1 개는 다음과 같은 노드내 중성자속 균형식에 의해 제공된다. 각 방향에 대한 일차원 중성자속의 평균이 같다는 조건은 이미 식(9)의 상수항 계수를 노드 평균 중성자속으로 전개하여 적용되었다.

$$\frac{1}{h}\left(J_x^r - J_x^l + J_y^r - J_y^l + J_z^r - J_z^l\right) + A\bar{f} = 0 \ . \qquad (10)$$

2.3 미지 계수의 결정

식(7)의 연립 방정식을 푸는 방법으로 각 조건을 대입하여 미지수를 하나씩 소거하여 마지막 미지수를 구한 다음 역으로 대입하여 모든 미지수를 구하는 일반적인 연립방정식 절차를 택하였다. 식(5)에 식(9)를 대입하고, 식(8)의 인입 부분 중성자류를 전개하면 미지수 a_{1u} 와 a_{2u} 를 다음과 같이 나타낼 수 있다. 각 군에 대해 동일한 형태가 나타나므로 군에 대한 변수는 생략한다.

$$\begin{aligned} a_{1u} &= \frac{-2D\,a_{3u} + 4h_u\,(j_u^{ir} - j_u^{il})}{4D + h_u} \ . \\ &= f\,(a_{3u}, j_u^{il}, j_u^{ir}) \end{aligned} \qquad (11)$$

$$\begin{aligned} a_{2u} &= -\frac{4D\,a_{4u} + 10h_u\,(\bar{f} - 2(j_u^{ir} + j_u^{il}))}{5(12D + h_u)} \ . \\ &= f\,(\bar{f}, a_{4u}, j_u^{il}, j_u^{ir}) \end{aligned} \qquad (12)$$

다음으로 식(7)을 전개하여 a_{1u} 와 a_{2u} 를 식(11)과 식(12)에 의해 소거하고, 식 (8)의 일차함수 $f_1(x)$ 와 이차함수 $f_2(x)$ 를 가중함수로 사용하여 식(1)에 가중적분법을 적용한다.

$$\frac{1}{h_u}\int_{-\frac{h_u}{2}}^{\frac{h_u}{2}} f_1(x)F(u)du = 0 \ . \qquad (13)$$

$$\frac{1}{h_u}\int_{-\frac{h_u}{2}}^{\frac{h_u}{2}} f_2(x)F(u)du = 0 \ . \qquad (14)$$

식(13)에 의해 a_{4u} 는 소거되고 a_{3u} 를 $\bar{f}$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 식(14)에 의해 a_{3u} 는 소거되고 a_{4u} 를 $\bar{f}$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$a_{3u} = f(\overline{f}) . \tag{15}$$

$$a_{4u} = f(\overline{f}) . \tag{16}$$

이제 노드내 중성자속 균형식 (10)을 이용하면 연계된 미지수는 모두 소거되고 노드 평균 중성자속만 미지수로 남아 $\overline{f}$ 를 구할 수 있으며, 나머지 미지수로 역으로 대입하여 구할 수 있다. 따라서 모든 미지수가 인입 부분중성자류의 함수로 결정되어 3 방향의 일차원 중성자속 분포가 정해지면 이 중성자속 분포로부터 각 방향의 외행 부분중성자류를 구할 수 있다. 이 결과를 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$J_{out} = f(J_{in}) \quad , \quad \overline{f} = f(J_{in}) , \tag{17}$$

3. 경계면 특성 보정 인자에 의한 CMFD 결합

앞 절에서 구한 결과를 이용하면, 한 노드로부터 나온 외행 부분중성자류는 인접한 노드의 인입 부분중성자류가 되고, 단일 격자 계산에서 결정된 노드 평균 중성자속은 다시 CMFD 계산에 이용되는 반복 계산을 통해 최종적으로 수렴된 해를 구하게 된다. CMFD 에서 구하는 값은 노드 평균 중성자속이므로 (17)식으로 구해진 외행 부분중성자류는 경계면의 순중성자류를 구하는데 사용되고, 이 순중성자류는 CMFD 식에 의해 쌍격자 평균 중성자속의 함수로 표시하는데 사용된다. 이 때 순중성자류는 경계면 좌우 격자에서 해당 경계면에 대해 구해진 외행 부분중성자류의 차이로써 구할 수 있다. 즉,

$$J = J_{out}^{r}\Big|_{L} - J_{out}^{l}\Big|_{R} . \tag{18}$$

여기서 $J_{out}^{r}\Big|_{L}$ 은 경계면 왼쪽 격자 (L)의 오른쪽 끝(r)에서의 외행 부분중성자류이고 $J_{out}^{l}\Big|_{R}$ 은 경계면 오른쪽 격자(R)의 왼쪽 끝(l)에서의 외행 부분중성자류이다. CMFD 계산에서의 순중성자류는 좌우 격자의 평균 중성자속의 함수로서 다음과 같이 표시되므로,

$$J = -\widetilde{D}(\overline{f}_R - \overline{f}_L) - \hat{D}(\overline{f}_R + \overline{f}_L) . \tag{19}$$

(17)식을 사용하여 격자간 연계 보정인자를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{D} = \frac{J_{out}^{r}\Big|_{L} - J_{out}^{l}\Big|_{R} - \widetilde{D}(\overline{f}_R - \overline{f}_L)}{\overline{f}_R + \overline{f}_L} . \tag{20}$$

CMFD 계산은 (20)식에 의한 경계면 연계 보정인자만 정의되면 수행될 수 있다. 그러나 CMFD 계산 결과인 노드 평균 중성자속 분포로부터 단일격자 노달 계산의 입력인 인입 부분중성자류를 결정하기 위해서 별도의 경계면 특성 보정인자가 필요하다. 여기에서는 별도의 경계면 특성 보정인자를 도입하여 경계면 중성자속을 경계면 좌우의 격자 평균 중성자속의 함수로 다음과 표시할 수 있도록 정의한다.

$$f_s = a\overline{f}_R + (1-a)\overline{f}_R + b(\overline{f}_R + \overline{f}_L) . \tag{21}$$

이 식에서 a 는 순수유한차분법을 적용했을 때 경계면 중성자속을 인접격자 평균 중성자속의 가중 평균으로 표시할 수 있는 가중치이고 b 가 바로 경계면 중성자속에 대한 보정인자이다. 두 부분중성자류의 합의 두 배가 경계면 중성자속이 되므로 b 도 (20)식에서와 유사하게 한 경계면에 대해 구해진 두 개의 외행 부분중성자류를 사용하여 결정할 수 있다. 즉,

$$b = \frac{2(J_{out}^{r}\big|_{L} + J_{out}^{r}\big|_{R}) - a\bar{f}_{R} - (1-a)\bar{f}_{L}}{\bar{f}_{R} + \bar{f}_{L}}. \qquad (22)$$

(19)식과 (20)식을 사용하면 CMFD 계산에 의해 결정된 격자 평균 중성자속으로부터 순중성자류와 경계면 중성자속을 결정할 수 있고, 이 둘로부터 인입 부분중성자류를 계산할 수 있다. 한 예로, 한 노드의 왼쪽 경계면에서의 x 방향 인입 부분중성자류는 다음과 같이 결정된다.

$$J_{xl}^{in} = \frac{1}{4} f_{xl}^{s} + \frac{1}{2} J_{x}^{l} \qquad (23)$$

여기서 f_{xl}^{s} 는 CMFD 결과로부터 (21)식에 의해 결정된 그 경계면에서의 중성자속이고 J_{x}^{l} 는 (19)식으로 결정된 순중성자류이다.

이러한 계산을 효율적으로 수행하는 비선형 반복 계산 기법은 참고문헌 [2]에 자세히 기술되어 있으며 본 논문에서는 Gauss-Seidel 식의 동일한 반복 계산기법을 사용하였다.

4. 시험 계산 및 비교 평가

본 논문에서 제시한 방법의 실효성을 검토하기 위해 한국원자력연구소의 핵설계 코드인 MASTER[3]의 한 선택적 계산 방식으로 구현하여 NEACRP A1 문제[4]의 초기 정상상태에 대한 해를 구하여, 이미 결과의 정확성이 검증된 통상의 노달 전개법과 쌍격자 방식의 비선형 노달 전개해와 비교하였다. MASTER 코드에는 이미 노달 전개법과 쌍격자 기반의 비선형 노달 방법이 장착되어 있어 비교가 가능하다. 그림 1은 정상상태의 반경방향 핵연료집합체별 출력 분포를 보여주고 있다. 3D 연계 단일 격자 방식의 해는 쌍격자 방식의 해와 동일한 결과를 보여 주며 통상적인 NEM 의 해와 유사한 결과를 보여주고 있다. 표 1은 계산 결과와 계산 시간을 비교한 것이다. 본 논문에서 제시한 단일격자 방식의 경우 노달 계산 횟수가 쌍격자 방식에 비해 약 56% 정도 증가하는 결과를 보였다. 이것은 쌍격자 방식에 비해 노드 경계면의 값이 안정적 수렴성을 보이지 않기 때문이다. 그러나 전체 계산 시간은 Coarse Mesh Rebalancing 가속 기법을 사용한 통상의 NEM 방법과 비슷하다.

5. 결론

본 논문에서는 단일 격자 방식에 대해 횡방향으로 적분된 3개의 일차원 중성자 확산 방정식을 연립하여 동시에 푸는 방법을 제시하였다. 이 방법은 CMFD 계산에서 한 노드의 중성자속 분포가 유일하게 결정되기 때문에 노심내에서 국부적인 내부경계조건을 갖는 문제를 푸는데 유용하게 사용될 수 있다. 이 방법을 NEACRP A1 표준문제의 초기 정상상태 고유치 계산에 적용한 결과, 수렴된 결과를 얻기 위한 노달 계산 횟수가 쌍격자 경우에 비해 증가하지만, 동일한 계산 정확성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

[1] H. C. Shin, et. al., "A Nonlinear Combination of CMFD (Coarse-Mesh Finite Difference) and FMFD (Fine-Mesh Finite Difference) Methods," *Proc. KNS Spr. Mtg*, Pohang, Korea, May, 1999.

[2] H. G. Joo, et. al., "One-Node Solution Based Nonlinear Analytic Nodal Method," *Proc. KNS Spr. Mtg*, Kori, Korea, May, 2000.

[3] B. O. Cho, *et. al*., "MASTER2.0: Multipurpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," *KAERI/TR-1211/99*, Korea Atomic Energy Research Institute (1999).

[4] H. Finnemann and A. Galati, "NEACRP 3-D LWR Core Transient Benchmark: Final Specification," *NEACRP-L-335, Rev. 1,* OECD Nuclear Energy Agency (1992).

표 1. 단일 격자 및 쌍격자 노달 계산 방식의 주요 계산 결과 비교

	초기 정상 상태 계산		
	NEM	2-Node NLNEM	1-Node NLNEM3D
임계붕산농도 (ppm) (**참고값** : 561.20)	562.46	562.88	562.88
반경 방향 핵연료 최대 출력	1.9049	1.9035	1.9035
축방향 AO(%)	-1.25	-1.24	-1.24
노달 계산 횟수	30	9	14
CMFD **계산 횟수**		27	42
노달 계산 시간, **초**	1.91	0.98	2.06
총 코드 수행 시간, **초**	5.45	2.33	3.96

- 4 node/FA **계산**

- Machine : Pentium III 700 MHz PC, WIN2000-OS

Y/X	I	J	K	L	M	N	O	P
8	0.9889	1.5147	1.0669	1.8008	1.8087	1.0057	0.3982	0.5475
	0.9873	1.5118	1.0654	1.7979	1.8087	1.0061	0.3984	0.5489
	0.9873	1.5118	1.0654	1.7979	1.8087	1.0061	0.3984	0.5489
9		1.8383	1.6553	1.9049	1.4205	0.5589	0.5626	0.4348
		1.8354	1.6528	1.9035	1.4193	0.5586	0.5638	0.4359
		1.8354	1.6528	1.9035	1.4193	0.5586	0.5638	0.4359
10			1.0116	1.4446	0.7296	0.7267	0.3850	
			1.0104	1.4433	0.7292	0.7281	0.3855	
			1.0104	1.4433	0.7292	0.7281	0.3855	
11				1.4339	1.0171	0.9506	0.5470	
				1.4334	1.0179	0.9517	0.5494	
				1.4334	1.0179	0.9517	0.5494	
12					0.5448	0.6782	----- NEM	
					0.5453	0.6816	----- 2-NODE NLNEM	
					0.5453	0.6816	----- 1-NODE NLNEM3D	

그림 1. 반경 방향 출력 분포 계산 결과 비교