

## 스펙트럼 이력 구배효과 보정을 위한 노드내 단면적의 지수함수 전개

### The Exponential Function Expansion of the Intra-nodal Cross Sections for the Spectral History Gradient Correction

조진영, 노재만, 정형국, 주형국  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

기존의 다항식전개법에 의한 스펙트럼 이력구배효과 보정방법을 간략히 하기 위하여 전부 13개의 연소점중 계산 노드안쪽에서의 4개의 연소점을 생략하고, 노드내 핵단면적의 분포를 지수함수로 근사하였다. 또 스펙트럼 이력구배 효과를 고려한 핵단면적도 기존 방법의 다항식전개법 대신 해석함수전개법을 이용하여 계산한 중성자속으로 가중평균하였다. 이 스펙트럼 이력구배효과 보정방법을 혼합핵연료와 우라늄핵연료가 장전된 3가지 유형의 노심(Checkerboard 형, 25개의 핵연료가 장전된 작은 노심, 177개의 핵연료가 장전된 상업용 노심)에 적용하였으며 그 결과를 CASMO-3 계산 또는 미세격자계산 결과와 비교하였다. 이러한 스펙트럼 이력구배효과 보정 방법은 기존의 다항식전개법에 의한 스펙트럼 이력구배효과 보정 방법에 비해 노드내 국부적 미시연소점의 수가 줄었음에도 불구하고 노심 반응도 예측면에서는 우수하게 나타났으며 노심내 출력분포 예측면에서는 거의 비슷한 수준의 결과를 보였다.

#### Abstract

In order to simplify the previous spectral history effect correction based on the polynomial expansion nodal method, a new spectral history effect correction is proposed. The new spectral history correction eliminates four microscopic depletion points out of total 13 depletion points in the previous correction by approximating the group cross sections with exponential function. The neutron flux to homogenize the group cross sections for the correction of the spectral history effect is calculated by the analytic function expansion nodal method in stead of the conventional polynomial expansion nodal method. This spectral history correction model is verified against the three MOX benchmark cores: a checkerboard type, a small core with 25 fuel assemblies, and a large core with 177 fuel assemblies. The benchmark results prove that this new spectral history correction model is superior to the previous one even with the reduced number of the local microscopic depletion points.

#### 1. 서론

핵연료집합체의 균질 핵단면적 생산을 위해 사용된 스펙트럼과 실제 노심의 스펙트럼의 차이로 발생하는 스펙트럼 이력구배효과를 보정하는 방법으로 다항식전개법에 의한 보정법[1]이 최근

에 개발되었다. 이 방법은 국부적 미시연소를 수행하여 노드내 스펙트럼 이력구배를 표현하기 때문에 기존의 연소도 구배법[2][3]에 비해 스펙트럼 이력구배효과를 더 정확히 묘사할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 노드내 스펙트럼 이력구배를 표현하기 위해 13개 국부지역에서 미시연소를 수행하여야 하기 때문에 노달 계산결과로 나타나는 노드평균 중성자속, 면 평균 중성자속, 꼭지점 중성자속 외에 노드내부에 4개의 연소점에서의 중성자속을 다시 계산하여야 한다. 또한 이전의 스펙트럼 이력구배효과 보정방법은 노달의 주어진 방법론으로 택한 해석함수전개 노달법과는 다른 방법인 다항식전개법을 스펙트럼 이력구배의 표현 및 스펙트럼 이력구배효과 보정치의 계산에 사용한다.

이 연구에서는 이러한 기존의 스펙트럼 이력구배효과 보정법의 단점을 극복하기 위해 노드내 스펙트럼 이력구배를 지수함수로 근사하였으며 스펙트럼 이력구배효과 보정치 계산에는 해석함수전개 노달법을 사용하였다. 노드내 스펙트럼 이력구배를 지수함수로 근사함으로써 기존의 13개 국부지역 미시 연소가 9개 국부지역 미시연소로 줄어들었으며 또한 스펙트럼 이력구배가 반영된 비균질노드를 해석함수전개 노달법에 의해 계산함으로써 그 정확도를 높일 수 있었다. 스펙트럼이력구배에 따른 스펙트럼이력효과 보정은 노드내 중성자속 가중평균 핵단면적과 노드내 핵단면적의 비균질에 따른 불연속인자로 보정하였다.[3]

## 2. 핵단면적 근사

그림 1은 노드내 스펙트럼 이력분포 근사를 위해 필요한 노드내 연소점 및 그 연소점에서의 핵단면적을 나타낸 것이다. 이들은 노드평균 핵단면적 1개, 면평균 핵단면적 4개, 노드 꼭지점에서의 핵단면적 4개이다. 이들 9개의 독립 핵단면적을 사용하면 노드내 핵단면적을 다음과 같은 지수함수로 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma_{ag}^n(\vec{r}) = & a_{g0} + a_{gx} \sinh(\alpha x) + a_{gy} \sinh(\alpha y) + b_{gx} \cosh(\alpha x) + b_{gy} \cosh(\alpha y) \\ & + c_{g00} \sinh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha x\right) \sinh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha y\right) + c_{g01} \sinh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha x\right) \cosh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha y\right) \\ & + c_{g10} \cosh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha x\right) \sinh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha y\right) + c_{g11} \cosh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha x\right) \cosh\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha y\right) \end{aligned} \quad (1)$$

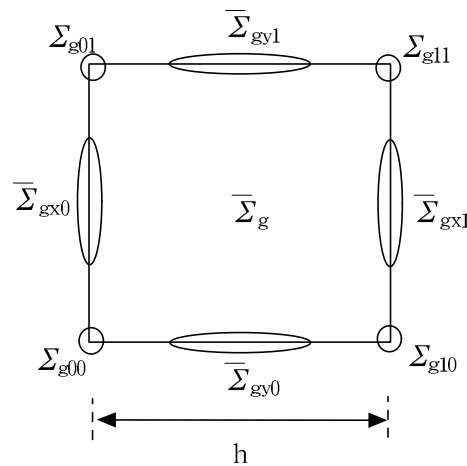


그림 1. 핵단면적 근사를 위한 연소점

여기서

$$\kappa = \sqrt{\frac{\sum_r}{D}},$$

위의 근사식을 이용하면 그림 1에 나타난 각 핵단면적을 식 (1)의 전개상수로서 나타낼 수 있다. 또한 식 (1)의 전개상수를 그림 1의 각 핵단면적의 함수로서 나타낼 수 있다.

한편, 중성자 확산계수와 중성자 산란단면적은 스펙트럼 이력에 따라 크게 변하지 않으므로 노드내에서 상수로 가정하였으며 이 연구에서는 중성자 흡수단면적과 핵분열단면적에 대해서만 위와 같이 노드내에서 스펙트럼 이력구배에 의한 분포를 가정하였다.

### 3. 스펙트럼 이력구배효과의 보정

해석함수전개 노달법에 의해 중성자 확산방정식의 해를 구하기 위해서는 각 꼭지점에서의 중성자 누설식, 각 면에서의 중성자류 연속식 및 노달 중성자 평형식이 필요하다. 중성자 누설식 및 중성자류 연속식에서는 중성자 확산계수가 사용되나 이는 스펙트럼 이력에 무관하다는 가정을 사용하였기 때문에 스펙트럼 이력분포에 무관하다. 따라서 스펙트럼 이력구배는 노달 중성자 평형식에서 중성자 흡수 반응을 및 핵분열 반응률에만 반영이 된다.

한편, 스펙트럼 이력구배효과는 아래와 같이 정의된 중성자속 가중평균 핵단면적,  $\bar{\Sigma}_{ag}$  과 노드 경계면에서의 불연속인자,  $f_{sg}$  로 보정할 수 있다.

$$\bar{\Sigma}_{ag} = \frac{\int_{V^n} \Sigma_{ag}(\vec{r}) \phi_g(\vec{r}) d\vec{r}}{\int_{V^n} \phi_g(\vec{r}) d\vec{r}}, \quad (2)$$

$$f_{sg} = \frac{\phi_{sg}^{het}}{\phi_{sg}^{hom}}. \quad (3)$$

여기서  $\phi_{sg}^{het}$  는 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드의 노달해이며  $\phi_{sg}^{hom}$  은 균질노드의 노달해이다. 이들 보정치들의 계산을 위해서는 스펙트럼 이력구배가 반영된 노드에 대한 노달해 뿐만 아니라 이로부터 도출된 중성자속 가중평균 핵단면적을 사용한 균질노드에 대한 노달해가 필요하다. 이들 노달해를 계산하기 위해 미세격자법, 다항식전개법등이 사용되어 왔으나 미세격자법은 시간이 많이 소요되며 다항식전개법은 노달의 주계산 방법론으로 택한 해석함수 전개법과 다른 방법이다. 따라서 이 연구에서는 해석함수 전개노달법을 사용하여 스펙트럼 이력구배가 반영된 노드 및 균질노드에 대한 노달해를 구하였다.

### 4. 수치계산 및 결과

위에서 설명한 연소도 구배효과 보정법의 검증을 위해 세가지 노심에 대해 이를 적용하였다. 첫 번째 노심은 우라늄핵연료와 혼합핵연료가 Checkerboard 형으로 무한히 장전된 노심(그림 2-a)이며, 두 번째 노심은 핵연료집합체 25개와 water 반사태로 구성된 작은 노심(그림 2-b)으로 스펙트럼 이력구배효과가 매우 클 것으로 예상되며 세 번째 노심은 177개의 핵연료집합체가 장전된 영광 3/4호기 실제 노심과 매우 유사한 노심(그림 2-c)이다. 우라늄 핵연료와 혼합핵연료에 대한 노달노심계산용 핵단면적은 단위집합체에 대한 CASMO-3 계산을 이용하여 연소도의 함수로 구성하였으며 이를 이용하여 노달 노심계산을 CASE1, CASE2, CASE3로 나누어 수행하였다. CASE1은 스펙트럼 이력구배효과가 고려되지 않은 경우이며 CASE2 참고문헌 1에서와 같은 방법으로 스펙트럼 이력구배효과를 보정한 경우이다. 그리고 CASE3은 위에서 설명한 바와 같이 노드

내 스펙트럼 이력구배효과를 보정한 경우이다. 그림 2-a 노심에 대한 표준해로는 CASMO-3 Color-Set 계산결과를 사용하였으며 각 집합체를 17x17로 분할한 미세격자 해석함수전개법의 해를 참고적으로 사용하였다. 그리고 그림 2-b 및 2-c 노심에 대한 표준해로는 각 집합체를 9x9로 분할한 미세격자 해석함수 전개법의 해를 사용하였다.

그림 3은 연소도에 따른 참고해의 노심 반응도 및 CASE1, CASE2, CASE3의 반응도 오차를 나타낸 것이다. Core 1의 경우 CASMO-3 결과와 비교할 때 CASE1은 연소도 40 MWD/kgHM에서 약 0.38%의 반응도차를 보이며 CASE2 및 CASE3은 약 0.12%, 0.16%의 반응도차를 보여 CASE3의 경우가 가장 오차가 작게 나타났다. 그러나 미세격자 계산결과 비교해 볼 때는 CASE3의 결과가 약 0.06%의 오차를 보여 가장 오차가 작게 나타났다. Core 2의 경우에는 연소도 30 MWD/kgU에서 CASE1의 경우에는 약 0.85%의 오차를 보였으나 CASE3의 경우에는 0.16%의 오차를 보여 상당히 정확함을 알 수 있다. Core 3의 경우에는 연소도 30 MWD/kgU에서 CASE1의 경우에는 약 0.39%의 오차를 보였으나 CASE3의 경우에는 0.20%의 오차를 보였다. 세가지 노심 계산 결과 앞에서 설명한 스펙트럼 이력 구배효과 보정 방법이 기존의 방법에 비해 우수함을 알 수 있다.

그림 4는 연소도에 따른 집합체별 상대출력오차를 비교한 것이다. 노심 2, 3의 경우 모두에서 CASE3은 CASE1에 비해 최대 오차가 절반정도로 줄어들었음을 알 수 있으며 또한 CASE2의 경우가 CASE3의 경우에 비해 노심출력을 잘 예측함을 알 수 있다. 이는 9개 국부지역 미시연소에 기초한 지수함수에 의한 스펙트럼 이력구배의 근사가 13개 국부지역 미시연소에 기초한 다항식 전개법에 비해 다소 떨어짐을 의미한다. 그림 5는 Core1의 봉출력을 연소도 40 MWD/kgU에서 비교한 것이다. CASE3가 기존의 방법인 CASE2에 비해 다소 우수하게 나타남을 알 수 있으며 스펙트럼 이력구배효과가 반영되지 않은 경우에 비해 상당히 정확도를 높였음을 알 수 있다.

이 연구에서는 노드내 단면적의 공간적 분포에 대한 지수함수에 기초한 스펙트럼 이력 구배효과 보정모델을 제시하였다. 이 보정모델은 노심 반응도 측면에서는 기존의 다항식전개법에 기초한 보정모델에 비해 우수하게 나타났으나 집합체 출력분포 예측능력에서는 거의 비슷한 수준을 보임을 알 수 있다. 그러나 Core1과 같이 단순한 노심에서는 봉출력을 우수하게 예측함을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 조진영 외, "국부적 미시연소에 의한 노드내 스펙트럼 이력구배효과 보정," '98 춘계학술발표회 논문집(I), 한국 원자력학회, 137-142, 1998.
2. MASTER- $\alpha$  Methodology Manual, KAERI/TR-686/96.
3. J. M. Noh and N. Z. Cho, "Intranodal Burnup Gradient Correction in Analytic Function Expansion Nodal (AFEN) Method," Proc. Intl. Conf. on Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analyses, Portland, Oregon, April 30 - May 4, 1995, vol. II, p.1435, American Nuclear Society (1995).

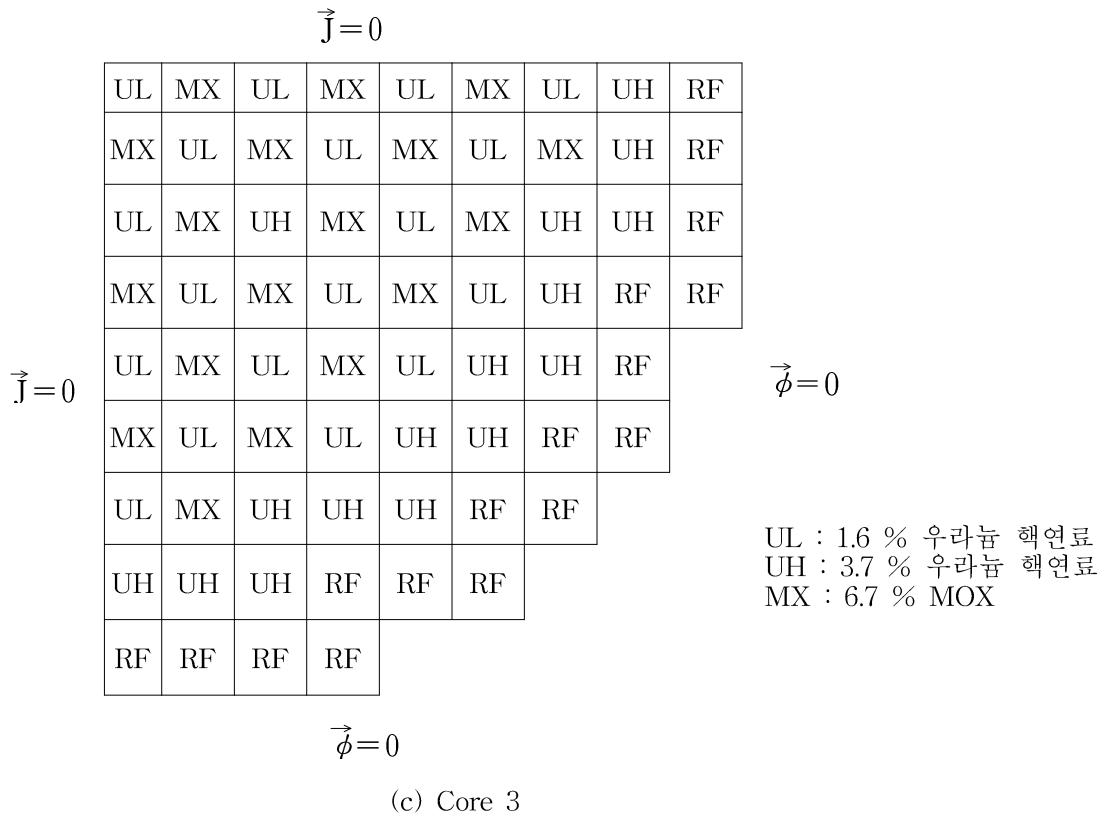
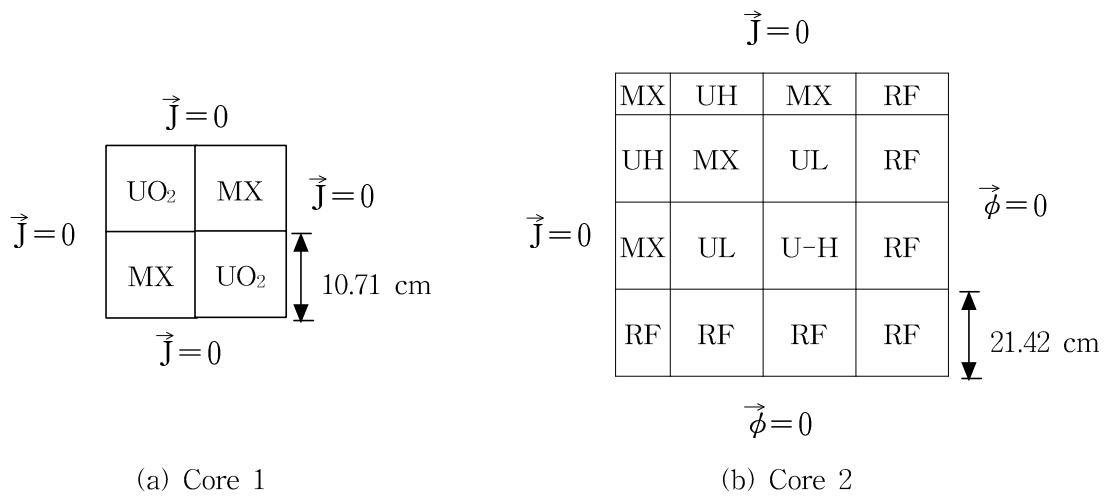
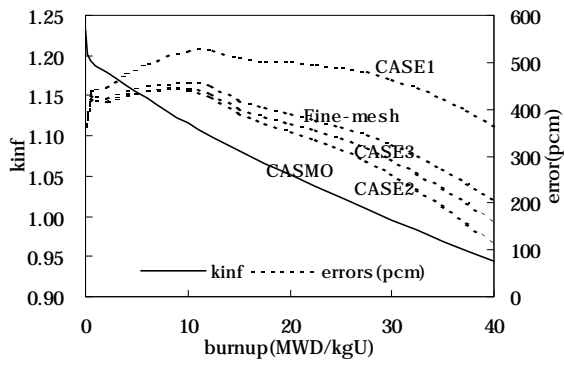
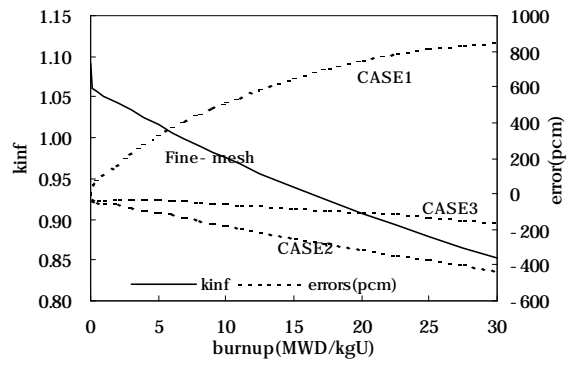


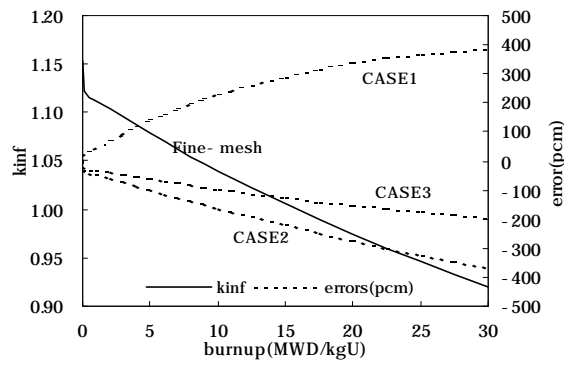
그림 2. 혼합핵연료 장전 노심



(a) Core 1

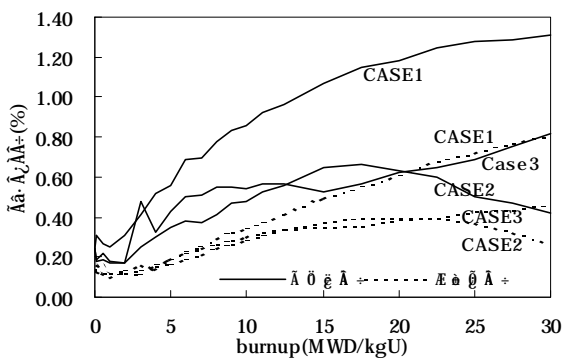


(b) Core 2

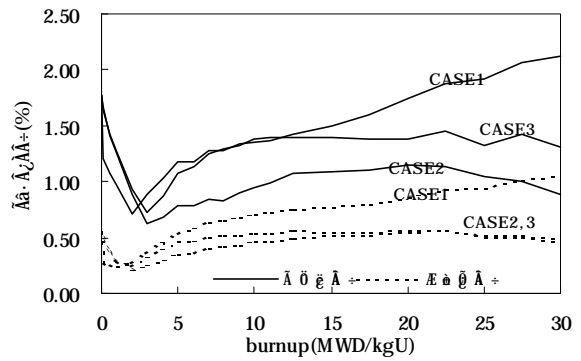


(c) Core 3

그림 3. 노심 반응도 오차



(a) Core 2



(b) Core 3

그림 4. 집합체별 상대출력 오차

0.000									
0.00									
0.00									
0.00									
0.944	0.939								
6.04	5.96								
-0.53	-1.81								
-0.42	-0.64								
0.945	0.940	0.940							
5.82	5.85	5.85							
-0.21	-1.60	-1.38							
-0.63	-0.85	-0.96							
0.000	0.945	0.946	0.000						
0.00	5.82	5.71	0.00						
0.00	-0.95	-0.74	0.00						
0.00	-0.74	-0.95	0.00						
0.944	0.939	0.940	0.947	0.950					
5.30	5.32	5.43	5.28	4.84					
0.53	-0.64	-0.32	0.21	0.42					
-0.53	-0.75	-0.85	-0.84	-0.84					
0.943	0.938	0.939	0.947	0.953	0.000				
4.45	4.48	4.47	4.33	4.09	0.00				
0.21	-0.64	-0.21	0.32	0.42	0.00				
-0.42	-0.64	-0.75	-0.74	-0.63	0.00				
0.000	0.940	0.941	0.000	0.947	0.935	0.918			
0.00	2.77	2.66	0.00	2.43	2.03	1.09			
0.00	-0.32	0.32	0.00	0.63	-0.21	-0.87			
0.00	-0.11	-0.32	0.00	-0.21	-0.11	0.44			
0.931	0.925	0.925	0.931	0.922	0.907	0.898	0.889		
-0.43	-0.65	-0.86	-0.97	-0.98	-0.88	-1.34	-2.81		
0.75	0.97	1.84	2.26	1.74	0.66	-0.78	-1.46		
0.86	0.76	0.76	0.75	0.65	0.99	1.22	1.69		
0.904	0.903	0.903	0.902	0.898	0.892	0.885	0.880	0.876	
-7.41	-8.08	-8.53	-8.43	-8.13	-7.62	-7.01	-7.05	-8.68	
2.10	2.77	3.65	4.10	3.56	2.02	0.34	-0.80	0.23	
1.88	1.88	1.77	1.77	1.89	2.02	2.26	2.39	2.85	
0.923	0.922	0.922	0.922	0.918	0.913	0.909	0.909	0.909	
8.99	9.76	10.20	10.30	10.13	9.64	9.02	8.91	11.99	
-2.06	-3.58	-4.88	-4.77	-3.27	-0.99	1.21	1.98	1.21	
-2.49	-2.60	-2.60	-2.49	-2.29	-2.08	-2.09	-2.42	-2.31	
1.112	1.100	1.101	1.116	1.100	1.085	1.078	1.081		
-0.90	-0.73	-0.54	-0.27	-0.36	-0.55	-0.37	1.48		
-1.62	-2.55	-3.27	-3.14	-2.27	-1.01	0.28	0.93		
-2.61	-2.55	-2.36	-2.15	-2.27	-2.58	-3.06	-3.52		
0.000	1.097	1.100	0.000	1.118	1.106	1.084			
0.00	-3.65	-3.64	0.00	-3.40	-3.25	-2.68			
0.00	-0.64	-1.18	0.00	-0.63	0.18	0.65			
0.00	-0.91	-0.73	0.00	-0.72	-1.18	-2.03			
1.168	1.148	1.153	1.192	1.111	0.000				
-3.94	-3.92	-3.90	-4.03	-4.32	0.00				
0.60	0.87	0.61	0.34	0.18	0.00				
0.60	1.05	1.30	1.17	0.54	0.00				
1.154	1.131	1.136	1.176	1.181					
-4.07	-4.07	-4.14	-4.25	-4.06					
0.61	1.33	1.06	0.77	0.85					
1.39	2.03	2.29	2.04	1.78					
0.000	1.152	1.156	0.000						
0.00	-4.34	-4.41	0.00						
0.00	1.22	1.04	0.00						
0.00	2.26	2.42	0.00						
1.145	1.121	1.123							
-4.19	-4.19	-4.27							
0.79	1.52	1.42							
1.83	2.41	2.67							
1.144	1.120								
-4.28	-4.20								
0.96	1.70								
1.57	2.23								
0.000									
0.00									
0.00									
0.00									

우라늄  
핵연료

혼합  
핵연료

	최대 오차 (%)	오차 평균 (%)
CASMO-3	-	-
CASE1	11.21	4.35
CASE2	-4.88	1.36
CASE3	-3.52	1.50

그림 5. Core 1의 연소도 40 MWD/kgHM에서의 붕출력 비교