

노심보호연산기 축방향 출력분포 합성방법 개선  
Improvement of Axial Power Distribution Synthesis Methodology in CPC

김형현, 지성구  
한국전력기술(주)

김영백  
한전원자력연료(주)

인왕기  
한국원자력연구소

요약

CPC의 축방향 출력분포 합성 능력은 LPD와 DNBR에 의한 원자로 정지에 직접 관련된 중요한 기능으로 현재는 상·중·하 노외계측기의 신호를 기반으로 Cubic Spline 함수를 사용하여 합성한다. 기존의 CPC에서는 신속하고 정확한 계산을 위하여 출력분포를 8종류로 구분하며 각 분포에 대한 함수세트를 미리 계산하여 내장하고 있다. 본 연구는 CPC의 축방향 출력분포 합성 기능을 개선시킬 수 있는 가능성을 타진하기 위하여 내장된 Cubic Spline 함수세트 뿐만 아니라 추가적인 다른 함수세트, 실수 분기점 함수세트 및 다항식 함수를 출력분포 합성에 적용하여 RMS 오차를 비교, 분석하였다.

분석 결과, 많은 부분에서 현재 내장된 함수세트가 최적이지 않음을 확인하였고 함수세트를 적절히 선택함으로써 RMS 오차를 대폭 감소시킬 수 있음을 보여 주었다.

Abstract

The capability of axial power distribution synthesis in CPC plays an important role in determining the DNBR and LPD trip caused by CPC. The axial power distribution is synthesized using the cubic spline function based on the three excore detector signals. The axial power distributions are categorized into 8 function sets and each sets are stored as pre-calculated values in CPC to save the calculation time. In this study, the additional function sets, the real break-point function sets and the polynomial function are suggested to evaluate the possibility of improving the synthesis capability in CPC. In addition, RMS errors are compared and evaluated for each synthesis method.

As a result, it was confirmed that the function sets stored in CPC were not optimal. The analysis result showed that RMS error could be reduced by selecting the proper function sets suggested in this study.

## 1. 서론

현재 표준형원전 및 차세대원전에서는 노심보호계통으로 노심보호연산기계통 (Core Protection Calculator System, CPCS)<sup>(1)</sup>을 사용하고 있다. 노심보호연산기계통은 표준형원전의 고유한 설계특성 중의 하나로서 On-Line으로 노심의 핵비등이탈률 (Departure from Nucleate Boiling Ratio, DNBR) 및 국부출력밀도 (Local Power Density, LPD)를 계산하고 이와 관련된 노심보호를 수행하는 원자로보호계통의 일부이다. 노심보호연산기계통은 계산된 DNBR 또는 LPD 값이 설정치를 초과하는 경우에 원자로 정지신호를 발생한다. 노심보호연산기계통은 노심보호를 위해 원자로냉각재펌프 속도, 가압기 압력, 고온관 및 저온관 온도, 노외계측기 신호, 제어봉집합체연산기 (Control Element Assembly Calculator, CEAC)의 Penalty Factor (PF) 및 제어봉 위치를 입력으로 사용하고 있다. CPC가 노심보호를 위한 DNBR 및 LPD 계산을 수행하기 위해서는 노심내의 축방향 및 반경방향 출력분포에 대한 정보가 요구된다. CPC에서는 노외계측기와 제어봉 위치신호 등을 이용하여 축방향 및 반경방향 출력분포를 계산한다.

현재 CPC의 축방향 출력분포는 3개의 노외계측기 신호를 입력으로 계산된다. 측정된 노외계측기 신호는 RSF (Rod Shadowing Factor) 및 TSF (Temperature Shadowing Factor) 등으로 교정된 후 SAM (Shape Annealing Matrix)을 거쳐서 노심외곽의 출력 준위로 변환된다. CPC는 3개의 노심외곽의 출력 준위로부터 20개의 세밀한 축방향 출력분포를 얻기 위하여 Cubic Spline 함수를 이용하여 출력분포를 합성한다<sup>(2)</sup>. 이때, 그림 1에 나타난 바와 같이 노심은 축방향으로 4개의 Cubic 함수영역으로 구분되며 그 영역들의 분기점 (Break Point)에 따라 각 영역에서의 Cubic 함수의 형상이 결정된다. Cubic 함수의 크기는 주어진 입력값을 바탕으로 계산되며 축방향 출력분포는 Cubic 함수의 합으로 결정된다.

현재 CPC는 표 1에 나타난 바와 같이 운전 중에 발생할 수 있는 축방향 출력분포를 8종류로 구분하고 있다. 이러한 구분은 약 3,600개의 다양한 출력분포의 분석을 통하여 결정된 것이다. CPC에서는 8종류의 축방향 출력분포 각각에 대하여 가장 적합한 Cubic 함수세트를 미리 계산하여 Database에 저장해 두고 상·중·하 노외계측기의 신호에 따라 축방향 출력을 결정할 수 있도록 되어 있다. 이렇게 합성된 CPC의 출력분포와 CECOR<sup>(3)</sup>에서 제공하는 출력분포 (즉, 기준 출력분포)의 RMS (Root Mean Square) 오차가 8%를 초과하면 그림 2와 같이 추가적인 페널티가 적용된다.

기존 CPC에서는 RMS 오차가 8%를 초과하여 페널티가 적용되는 경우가 발생할 가능성이 존재하며, RMS 오차가 핵연료의 연소에 따라 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그림 3은 영광 3호기 6주기의 실제 운전 자료로서 CPC의 RMS 오차가 연소에 따라 증가하는 경향을 보여주며 있으며, 주기말에 채널 B는 오차가 거의 8%에 근접함을 알 수 있다. 연소에 따라 RMS 오차가 증가하는 현상은 SAM을 출력상승시험 중의 제한된 자료를 바탕으로 결정하는데 그 원인이 있다. RMS 오차에 대한 해결방안으로 SAM 측정방법의 개선도 고려할 수 있으나 본 연구에서는 CPC 알고리즘의 개선을 통한 해결방안의 가능성을 검토하였다. 즉, 본 연구에서는 CPC가 계산한 축방향 출력분포의 RMS 오차를 감소시킬 수 있는 방안을 강구하고 그 적용 가능성을 타진하였다.

표 1과 같이 CPC에 내장된 함수세트 이외에 다양한 함수세트를 이용하여 자료를 분석함으로써 주어진 조건에 가장 적합한 함수세트를 결정하였다. 분석에 사용된 자료는 영광 3호기의 운전 자료와 ROCS<sup>(4)</sup> 모사 결과로서 다양한 함수세트로 출력분포를 합성하고 그 결

과를 CECOR 및 ROCS 결과와 비교하여 RMS 오차를 계산하였다. 또한, 정밀한 분석을 위하여 현재 정수로 된 분기점을 실수로 변경하여 적용하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 축방향 출력분포 합성 방법론

가. 추가적인 정수 분기점 적용

현재 CPC에 내장된 함수세트는 표 1에 나타난 바와 같이 2882, 2873 및 2837의 3종류이지만 하부로 치우친 출력분포에 대해서는 3782 및 7382가 더 고려되기 때문에 실제로는 5종류의 함수세트를 사용한다. 함수세트에 의한 영향을 분석하기 위해서 추가적으로 9종류의 함수세트 (3773, 4664, 5555, 2864, 4682, 2783, 3872, 2684 및 4862)를 이용하여 출력을 합성하였다. 영광 3호기 6주기 운전자료 및 영광 3호기 3주기 ROCS 모사자료가 분석에 사용되었다.

나. 실수 분기점 적용

RMS 오차는 어떤 함수세트를 사용하는가에 따라 달라지므로 최적 분기점을 찾기 위하여 영역 구간을 12888812(1.2, 8.8, 8.8, 1.2)와 같은 실수 범위로 확장하여 적용하였다. 이것은 영광 3호기 6주기 운전 자료의 분석에 대해 적용되었고 정수 분기점을 대상으로 수행한 분석 결과, 3782 함수세트가 가장 정확한 출력분포를 제공하였기 때문에 실수 분기점 해석에는 3782 함수세트를 중심으로 함수 분기점을 0.1씩 변화시켜서 수행하였다.

다. 다항식(polynomial) 함수

Fitting 함수를 Cubic Spline 함수가 아닌 최고차항이 6차인 Power Series 다항식 함수로 축방향 출력을 합성하여 그 결과를 비교하였다. 이 때 출력분포 합성에 사용된 다항식 함수는  $F(z) = a_6z^6 + a_5z^5 + a_4z^4 + a_3z^3 + a_2z^2 + a_1z^1 + a_0$ 이다. 최고차항의 차수는 주어진 조건 즉, 노심 상·중·하부의 3개의 노외계측기 신호, 노심 양 끝에서의 값 및 외삽 위치에서의 값 등 7개로 주어지기 때문에 6차로 결정되었다. 주어진 조건으로 이 식을 풀면 다음과 같이 7x7 matrix로 정리될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -\delta & \delta^2 & -\delta^3 & \delta^4 & -\delta^5 & \delta^6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{H}{3} & \frac{H^2}{18} & \frac{H^3}{81} & \frac{H^4}{324} & \frac{H^5}{1215} & \frac{H^6}{4374} & \frac{H^7}{15309} \\ \frac{H}{3} & \frac{3H^2}{18} & \frac{7H^3}{81} & \frac{15H^4}{324} & \frac{31H^5}{1215} & \frac{63H^6}{4374} & \frac{127H^7}{15309} \\ \frac{H}{3} & \frac{5H^2}{18} & \frac{19H^3}{81} & \frac{65H^4}{324} & \frac{211H^5}{1215} & \frac{665H^6}{4374} & \frac{2059H^7}{15309} \\ 1 & H^1 & H^2 & H^3 & H^4 & H^5 & H^6 \\ 1 & (H+\delta) & (H+\delta)^2 & (H+\delta)^3 & (H+\delta)^4 & (H+\delta)^5 & (H+\delta)^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ LB \\ A_B \\ A_M \\ A_T \\ UB \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기에서  $LB, UB$ 는 노심 상하부에서의 축방향 출력,  $A_T, A_M, A_B$ 는 각각 상·중·하 노외계측기 신호를 SAM으로 변환하여 만든 노심외곽의 상·중·하 출력을 나타낸다. 축방향

출력분포는 계수  $a_0, \dots, a_6$ 을 계산하여 다항식으로 주어진다.

### 3. 계산결과 및 평가

그림 4는 영광 3호기 6주기에서 연소도에 따른 축방향 출력분포의 변화를 보여준다. 출력분포는 초기의 평탄한 모습에서 연소가 진행됨에 따라 점점 Saddle 형태로 바뀌고 있다. 그림 5는 영광 3호기 6주기 CPC B 채널의 연소에 따른 상·중·하 축방향 출력 및 상하 출력차를 나타낸다. CPC에서 출력 형태를 결정할 때 중간 출력값과 상하 출력차를 이용한다. 그림 4에 나타난 바와 같이 연소에 따라 출력 형태가 상당히 변하지만 CPC는 전 주기 동안  $K=3$  즉 2882 함수세트만으로 축방향 출력을 합성한다.

그림 6 및 그림 7은 2882 이외에 다른 함수세트를 사용하여 출력분포를 합성했을 때의 CECOR 값에 대한 RMS 오차이다. 2882가 대부분의 함수세트보다 더 정확한 결과를 제공하지만 연소도가 주기의 약 1/3을 지나면 3782와 3872는 2882 보다 더 정확하게 출력분포를 제공한다. 3872는 현재 CPC에 내장되어있지 않은 함수세트다. 또한, 2882 보다 이 두 함수 세트의 오차는 연소도에 따라 천천히 증가함을 보여준다. 이 밖에도, 4682나 4862와 같은 함수 세트는 연소에 따라 오히려 오차가 감소하고 있어 실제 운전상 문제가 주기 말에 발생함을 고려할 때 함수세트를 적절히 선택하면 개선의 여지가 충분히 있음을 보여준다.

그림 7에 나타난 바와 같이 3782는 주기말에서 2882보다 1% 이상 RMS 오차가 감소되었다. 이와 같이, CPC의 함수세트의 선택논리를 개선함으로써 RMS 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 8은 영광 3호기 6주기 주기말에서 축방향 출력분포의 비교결과를 보여주고 있다. CECOR의 계산결과는 상부로 치우친 Saddle 형태의 출력을 보이는 반면, CPC는 오히려 하부로 치우친 결과를 보이고 있다. 그러나, 3782나 3872는 하부로 치우친 출력분포이지만 상부에서의 출력이 CECOR에 상당히 접근하고 있으며 이것이 전체 RMS 오차를 감소시키는 역할을 하고 있다.

그림 9와 그림 10은 각각 실수 함수세트를 사용한 경우의 RMS 오차와 채널 B의 출력분포를 보여주고 있다. 실수 함수세트는 3782를 중심으로 0.1씩 변화시키면서 RMS 오차를 비교하였다. 영광 3호기 6주기의 경우 3782와 2891 사이의 실수 함수세트는 그림 9에 나타난 바와 같이 RMS 오차는 3782에 비해 상당히 감소됨을 알 수 있다. 그림 10의 출력분포는 실수 함수세트가 노심하부에서 출력분포를 개선시켜 전체적으로는 RMS 오차를 감소시킴을 보여준다.

영광 3호기 6주기의 운전 자료의 분석을 종합하면 전 주기동안 RMS 오차가 가장 큰 연소조건에서 현재 CPC가 선택하는 2882 함수세트는 RMS 오차가 7.83%인 출력분포를 제공하나 3782 함수세트는 6.81%, 실수 함수세트인 25748415 (2.5, 7.4, 8.4, 1.5)는 5.08%로 거의 3% 정도 감소된 것으로 나타났다.

영광 3호기 6주기의 운전 자료의 축방향 출력분포는 전 주기동안  $K=3$  (즉, 2882) 형태였다. 다양한 축방향 출력분포의 합성 능력을 검토하기 위하여 영광 3호기 3주기의 ROCS 모사자료를 이용하였다. ROCS 모사는 Short BOC, Long BOC 및 EOC 상태에서 다양한 축방향 출력분포를 합성하기 위하여 출력, 지논 및 제어봉을 조절해 가면서 각각 1202개의 경우를 모사하였다. 각 경우의 상·중·하 축방향 출력 준위를 여러 가지 정수 함수세트로 출력분포를 합성하여 주어진 참고 출력분포인 ROCS 결과와 비교하였다.

표 2와 표 3은 ROCS 모사 결과를 앞에서 설명한 정수 함수세트와 다항식으로 합성하

여 CPC에 내장된 모드 (K) 별로 정리한 결과이다. 표 2는 모든 결과를 포함하였고 표 3에서는 ASI (Axial Shape Index)가 운영기술지침서 상의 운전제한조건 이내의 경우 (즉,  $-0.27 < ASI < 0.27$ )만을 정리하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 약 30% (총 3606 중 1075) 정도가 개선되었으며, BOC에 비해 EOC에서의 개선율이 약 8% 정도 더 높은 것으로 나타났다. 표 2와 표 3에서 모드 5 (2837)의 경우는 ASI가 모두 정상 운전범위인  $\pm 0.27$ 을 초과하는 노심조건이지만 CPC는 모든 경우에 최적 함수세트를 선택하지 않음을 보여주고 있다. 모드 4인 경우도 ASI가 모두 운전제한조건을 초과하는 운전조건이지만 개선율이 80% 이상인 것으로 나타났다.

또한, EOC의 모드 2 (2873)인 경우에는 ASI에 상관없이 CPC가 최적 함수세트를 사용하지 않음을 보여준다. 이것은 기존의 CPC 설계 시에 전산기에 의한 제한으로 계산시간을 단축하고 선택논리를 단순화하기 위함으로 판단되며 현재 전산기의 속도나 용량이 비교할 수 없을 정도로 향상되었기 때문에 개선의 여지가 충분한 것으로 판단된다.

표 4에서 표 6까지는 위의 결과를 더욱 자세히 보여준다. 여기에서 KDIR은 상하 외곽 출력준위에 의해 결정되며 상부로 치우친 출력분포인 경우는 +1, 하부로 치우친 출력분포인 경우는 -1로 주어진다. 개선된 경우에 한하여 최적 함수세트와 그때의 RMS 오차 개선 정도를 정리하였다. 표 4와 표 5에서는 BOC의 경우 Short와 Long에 관계없이 비슷한 경향을 보이고, 모드 5의 경우만을 제외하면 RMS 오차가 모두 8% 미만인 것으로 나타났다. 모드 5 (2837)의 경우에는 모든 경우가 개선되었으며 RMS 오차가 거의 1/10 정도로 감소되었다.

그림 11은 Short BOC, 모드 5의 한 예로 그 때의 출력분포를 ROCS 결과와 비교한 것이다. CPC의 2837은 ROCS와 매우 다른 결과를 보이는 반면, 2882 및 3773은 모두 ROCS와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. BOC의 모드 4인 경우에 CPC는 대부분의 경우에 최적 함수세트를 사용하지 않았으며 그때의 RMS 오차도 최적 함수세트를 사용하면 대부분의 경우 50% 정도가 감소함을 알 수 있다. 표 6은 EOC의 분석 결과로 CPC가 축방향 합성오차가 가장 큰 부분이다. 모든 모드에서 상당한 개선의 여지가 있음을 보여주고 있으며 특히 BOC와 마찬가지로 모드 5의 경우가 RMS 오차의 차이가 가장 뚜렷하다. 몇 가지 경우에는 Cubic Spline 함수보다는 다항식으로 합성한 출력이 더 좋은 결과를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

CPC의 축방향 출력분포 합성 능력은 LPD와 DNBR에 의한 원자로 정지에 직접 관련된 중요한 기능으로 현재는 상·중·하 노외계측기의 신호를 기반으로 Cubic Spline 함수를 사용하여 합성한다. 기존의 CPC에서는 신속하고 정확한 계산을 위하여 출력분포를 8종류로 구분하며 각 분포에 대한 함수세트를 미리 계산하여 내장하고 있다. 본 연구는 CPC의 축방향 출력분포 합성 기능을 개선시킬 수 있는 가능성을 타진하기 위하여 내장된 Cubic Spline 함수세트 뿐만 아니라 다른 함수세트, 실수 분기점 함수세트 및 다항식을 출력분포 합성에 적용하여 RMS 오차를 비교, 분석하였다. 분석 대상으로 영광 3호기 6주기의 운전 자료와 영광 3호기 3주기의 ROCS 모사자료를 이용하였다.

분석 결과, 많은 부분에서 현재 내장된 함수세트가 최적이지 않음을 확인하였고 함수세트를 적절히 선택함으로써 RMS 오차를 대폭 감소시킬 수 있음을 보여 주었다. 특히 실수로 영역을 분기할 경우는 더욱 많은 연구가 필요할 것이다. 이러한 분석 결과를 CPC에 실제로

적용하기 위해서는 선택논리의 개선과 CPC DNBR/LPD 계산 불확실도에 미치는 영향 등도 연구되어야 하며 SAM 자체의 개선도 병행하면 최선의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 참고문헌

- (1) Combustion Engineering Inc., 1974, Assessment of the accuracy of PWR safety system actuation performed by the core protection calculators, CENPD-170.
- (2) 인왕기, 유형근, 어근선, 이종철, 김시환, 1991, 실시간 노심출력분포 측정을 위한 3차 Spline 합성법의 응용, J. KNS, 23(3), pp. 316-320.
- (3) Combustion Engineering Inc., 1980, Evaluation of uncertainty in the nuclear power peaking measured by the self-powered, fixed incore detector system, CENPD-153-P, Rev. 1-P-A.
- (4) Combustion Engineering Inc., 1993, ROCS users manual, Windsor, Connecticut, USA.

표 1. CPC에 내장된 함수세트

k	Shape	$P_{MID}$ (%)	$\Delta =  P_{TOP} - P_{BOT} $	Function Sets
1	Center Peak	$> 40$	$\leq 12$	2882
2	Center Peak	$> 40$	$> 12$	2873
3	Flat	$34 \leq P_{MID} \leq 40$	$< 25$	2882
4	Flat	$34 \leq P_{MID} \leq 40$	$25 \leq \Delta \leq 35$	2873
5	Flat	$34 \leq P_{MID} \leq 40$	$> 35$	2837
6	Saddle	$< 34$	$< 20$	2882
7	Saddle	$< 34$	$20 \leq \Delta \leq 40$	2882
8	Saddle	$< 34$	$> 40$	2882

표 2. ROCS 모사 분석 결과 (모든 경우 포함)

k	Set	Short BOC	Long BOC	EOC
1	2882	15/ 65 ( 23.1%)	13/ 65 ( 20.0%)	38/ 44 ( 86.4%)
2	2873	25/ 90 ( 27.8%)	35/ 101 ( 34.7%)	187/ 187 (100.0%)
3	2882	109/ 790 ( 13.8%)	96/ 767 ( 12.5%)	17/ 109 ( 15.6%)
4	2873	124/ 150 ( 82.7%)	134/ 150 ( 89.3%)	13/ 13 (100.0%)
5	2837	50/ 50 (100.0%)	50/ 50 (100.0%)	117/ 117 (100.0%)
6	2882	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	4/ 238 ( 1.7%)
7	2882	0/ 27 ( 0.0%)	0/ 29 ( 0.0%)	18/ 168 ( 10.7%)
8	2882	1/ 30 ( 3.3%)	0/ 40 ( 0.0%)	29/ 326 ( 8.9%)
Total		324/1202 ( 27.0%)	328/1202 ( 27.3%)	423/1202 ( 35.2%)
		1075/3606 ( 29.8%)		

표 3. ROCS 모사 분석 결과 (-0.27<ASI<0.27인 경우)

k	Set	Short BOC	Long BOC	Long EOC
1	2882	15/ 65 ( 23.1%)	13/ 65 ( 20.0%)	38/ 44 ( 86.4%)
2	2873	22/ 63 ( 34.9%)	30/ 66 ( 45.5%)	44/ 44 (100.0%)
3	2882	89/ 736 ( 12.1%)	78/ 724 ( 10.8%)	15/ 104 ( 14.4%)
4	2873	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)
5	2837	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)
6	2882	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	4/ 238 ( 1.7%)
7	2882	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	4/ 44 ( 9.1%)
8	2882	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)	0/ 0 ( %)
Total		126/ 864 ( 14.6%)	121/ 855 ( 14.2%)	105/ 474 ( 22.2%)
		352/2193 ( 16.1%)		

표 4. ROCS 모사 분석 결과 - 최적 함수세트와 RMS 오차 개선 (Short BOC)

k	CPC Set	KDIR	Best Set	Best / Case	RMS 오차 (%)
1	2882	-1	3782	15/ 41	2.78 ⇔ 2.25
2	2873	1	2882	1 / 1	6.60 ⇔ 1.44
	3782	-1	2882	11/ 89	2.66 ⇔ 1.63
	3782	-1	3872	13/ 89	2.28 ⇔ 2.06
3	2882	1	3773	6/455	4.34 ⇔ 4.10
	2882	-1	2873	5/335	2.55 ⇔ 2.09
	2882	-1	3782	33/335	3.74 ⇔ 2.36
	2882	-1	2783	3/335	2.41 ⇔ 2.04
	2882	-1	3872	62/335	2.65 ⇔ 1.90
4	2873	1	2882	112/119	5.01 ⇔ 2.27
	3782	-1	2882	1/ 31	3.31 ⇔ 1.42
	2873	1	3773	7/119	5.39 ⇔ 3.83
	3782	-1	3872	4/ 31	2.50 ⇔ 2.48
5	2837	1	2882	47/ 50	29.88 ⇔ 2.67
	2837	1	3773	3/ 50	29.69 ⇔ 3.86
8	2882	1	3773	1/ 30	3.89 ⇔ 3.83

표 5. ROCS 모사 분석 결과 - 최적 함수세트와 RMS 오차 개선 (Long BOC)

k	CPC Set	KDIR	Best Set	Best / Case	RMS 오차(%)
1	2882	-1	3782	13/ 45	2.70 ⇔ 2.32
2	2873	1	2882	1/ 1	6.64 ⇔ 1.54
	3782	-1	2882	20/100	2.69 ⇔ 1.74
	3782	-1	3872	14/100	2.46 ⇔ 2.23
3	2882	1	3773	3/442	4.49 ⇔ 4.27
	2882	-1	2873	8/325	2.75 ⇔ 2.29
	2882	-1	3782	21/325	3.80 ⇔ 2.61
	2882	-1	2783	3/325	2.41 ⇔ 2.13
	2882	-1	3872	61/325	2.69 ⇔ 2.05
4	2873	1	2882	111/114	5.07 ⇔ 2.25
	3782	-1	2882	4/ 36	3.54 ⇔ 1.36
	2873	1	3773	3/114	5.58 ⇔ 3.90
	3782	-1	3872	16/ 36	2.74 ⇔ 2.69
5	2837	1	2882	50/ 50	29.95 ⇔ 2.46



표 6. ROCS 모사 분석 결과 - 최적 함수세트와 RMS 오차 개선 (EOC)

k	CPC Set	KDIR	Best Set	Best / Case	RMS 오차 (%)
1	2882	-1	2864	3/ 27	7.18 ⇨ 4.90
	2882	-1	2873	1/ 27	4.32 ⇨ 4.10
	2882	-1	2837	22/ 27	7.60 ⇨ 3.33
	2882	1	poly	12/ 17	8.00 ⇨ 5.58
2	2873	1	2882	1/ 8	7.94 ⇨ 3.68
	3782	-1	2882	1/179	5.12 ⇨ 3.28
	2873	1	4664	3/ 8	9.47 ⇨ 7.45
	3782	-1	2864	111/179	6.95 ⇨ 3.15
	3782	-1	2837	67/179	7.41 ⇨ 3.71
	2873	1	poly	4/ 8	9.05 ⇨ 6.14
3	2882	1	3773	3/ 55	6.56 ⇨ 6.21
	2882	1	4664	1/ 55	10.48 ⇨ 8.45
	2882	-1	2864	1/ 54	4.69 ⇨ 3.98
	2882	-1	2873	2/ 54	4.48 ⇨ 4.26
	2882	1	poly	10/ 55	8.17 ⇨ 6.10
4	2873	1	2882	8/ 8	6.44 ⇨ 4.48
	3782	-1	2882	4/ 5	6.11 ⇨ 2.86
	3782	-1	2837	1/ 5	5.61 ⇨ 2.03
5	2837	1	2882	6/ 6	30.58 ⇨ 4.10
	7382	-1	2882	1/111	34.39 ⇨ 2.57
	7382	-1	2882	75/111	37.35 ⇨ 2.99
	7382	-1	2882	35/111	35.51 ⇨ 3.09
6	2882	-1	2783	4/ 96	5.57 ⇨ 5.22
7	2882	-1	2783	16/ 73	5.42 ⇨ 5.03
	2882	-1	2648	2/ 73	7.18 ⇨ 5.45
8	2882	1	2783	23/ 34	5.77 ⇨ 5.19
	2882	-1	2648	6/ 34	7.01 ⇨ 5.51

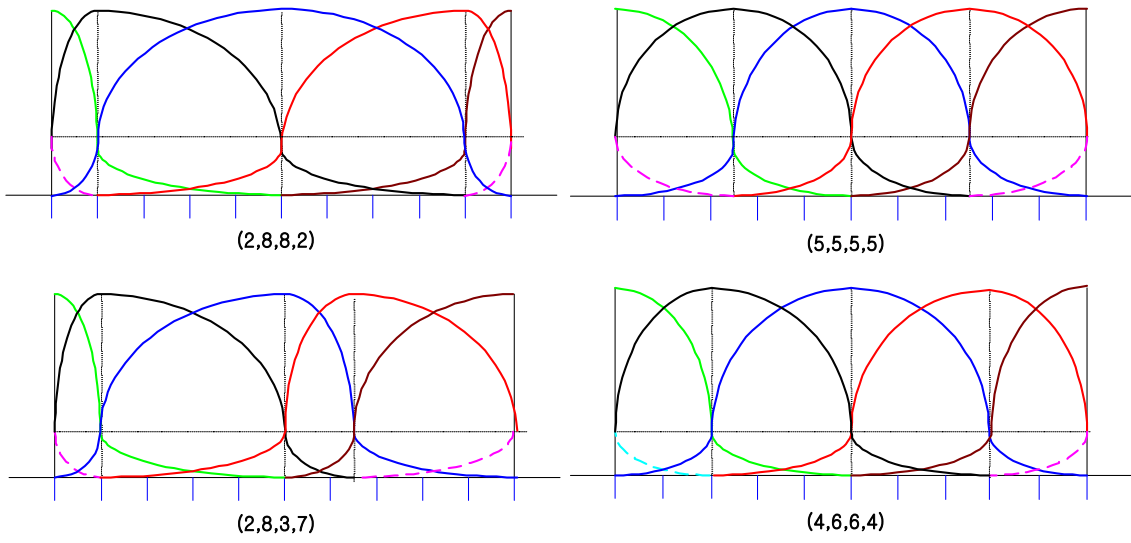


그림 1. 여러 가지 분기점과 Cubic Spline 함수

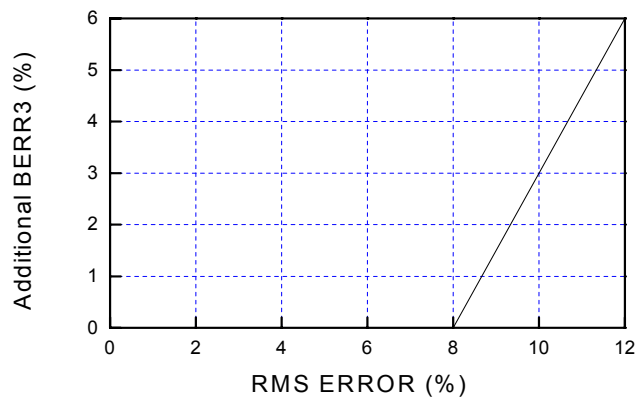
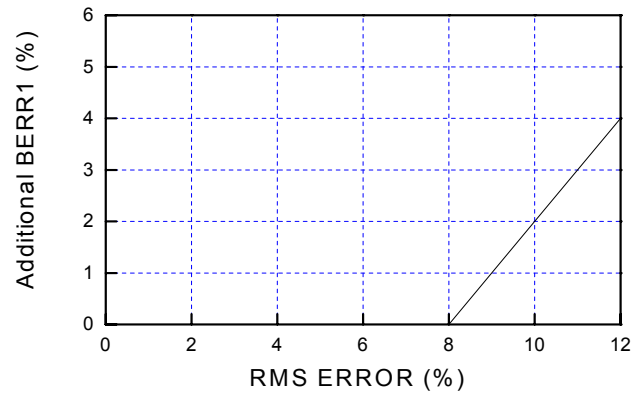


그림 2. 축방향 출력분포의 RMS 오차에 따른 Penalty

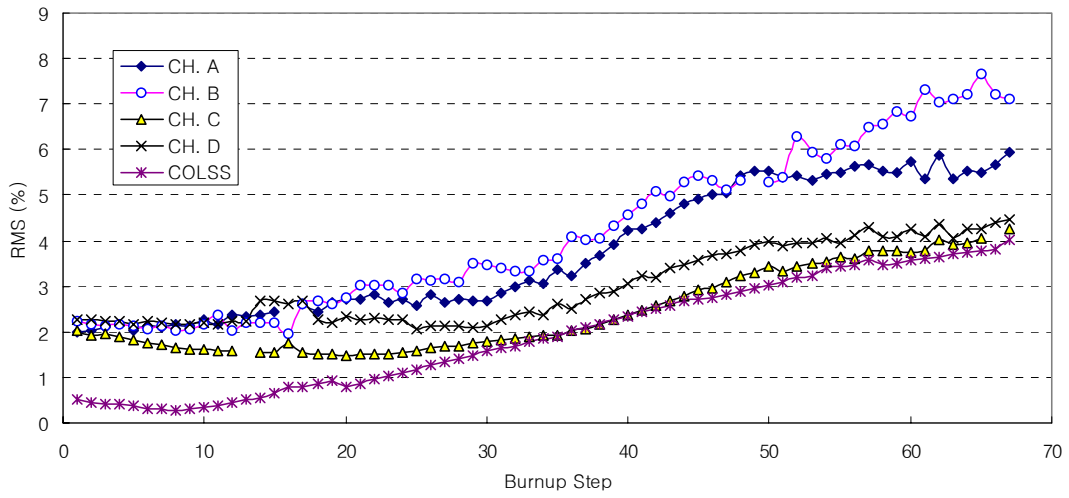


그림 3. 연소도에 따른 RMS 오차 (영광 3호기 6주기)

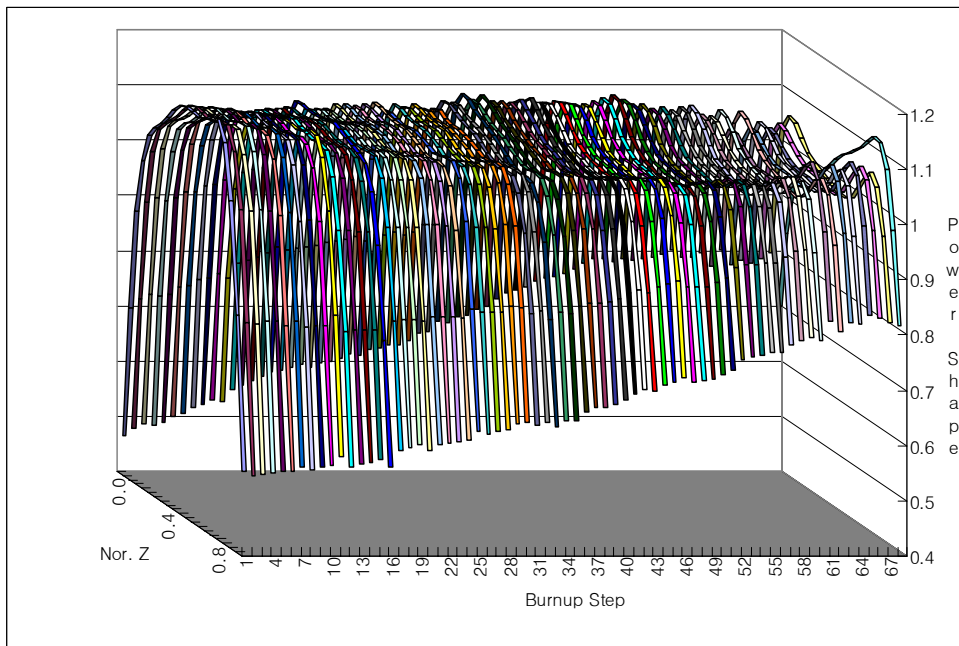


그림 4. 연소도에 따른 축방향 출력분포 변화 (영광 3호기 6주기)

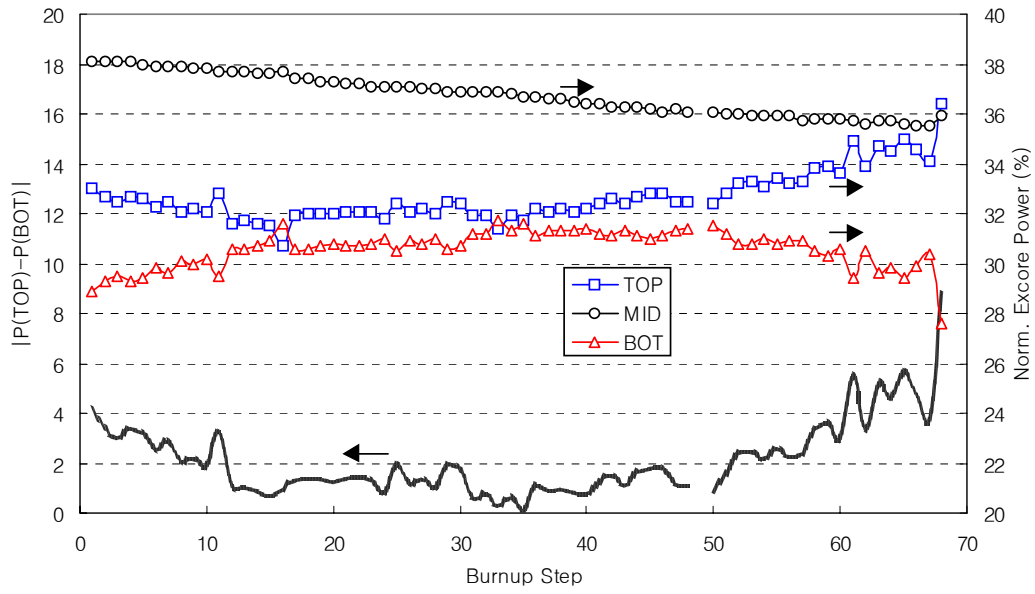


그림 5. 연소도에 따른 상·중·하 축방향 출력 및 상하 출력차  
(영광 3호기 6주기, 채널 B)

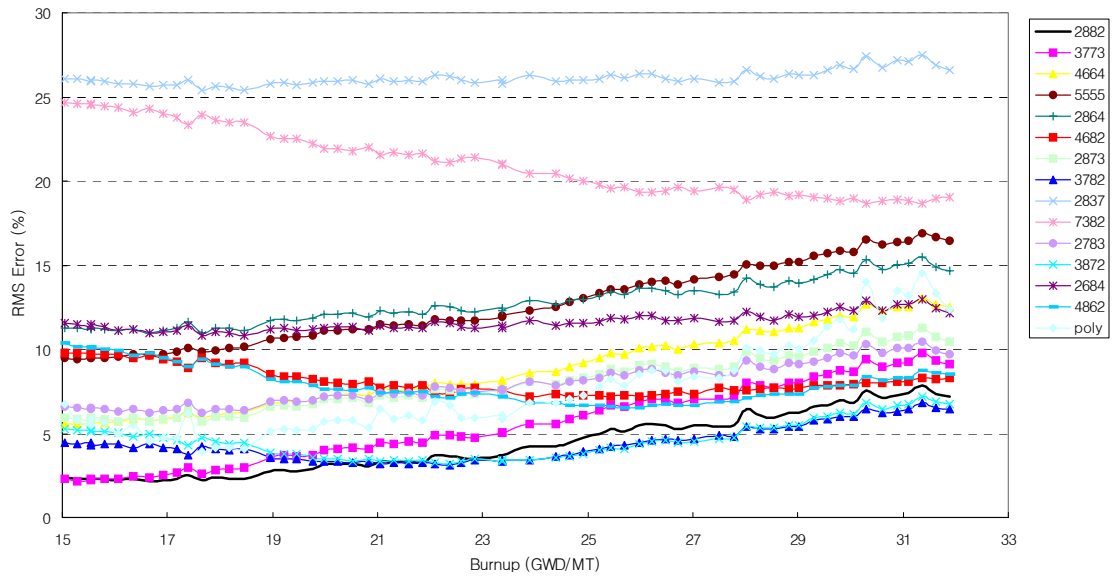


그림 6. 여러 가지 함수세트를 사용시 RMS 오차  
(영광 3호기 6주기, 채널 B) (1/2)

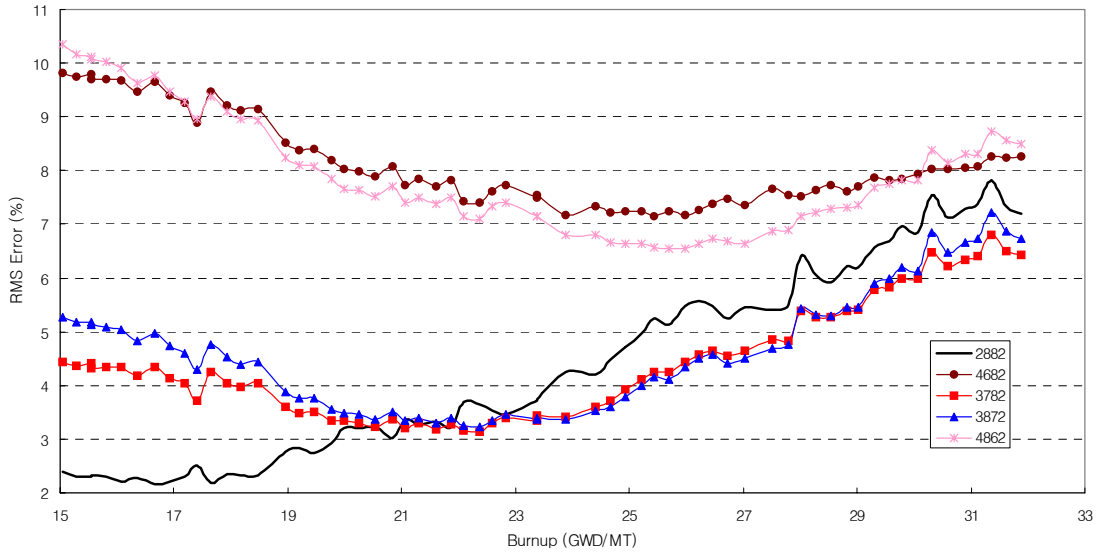


그림 7. 여러 가지 함수세트를 사용시 RMS 오차  
(영광 3호기 6주기, 채널 B) (2/2)

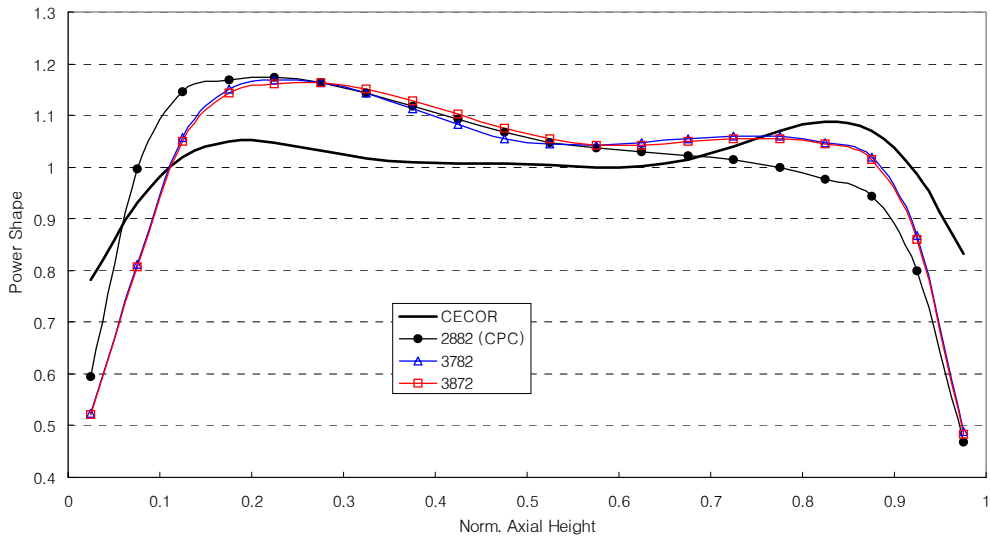


그림 8. 정수 함수세트의 출력분포 (영광 3호기 6주기)

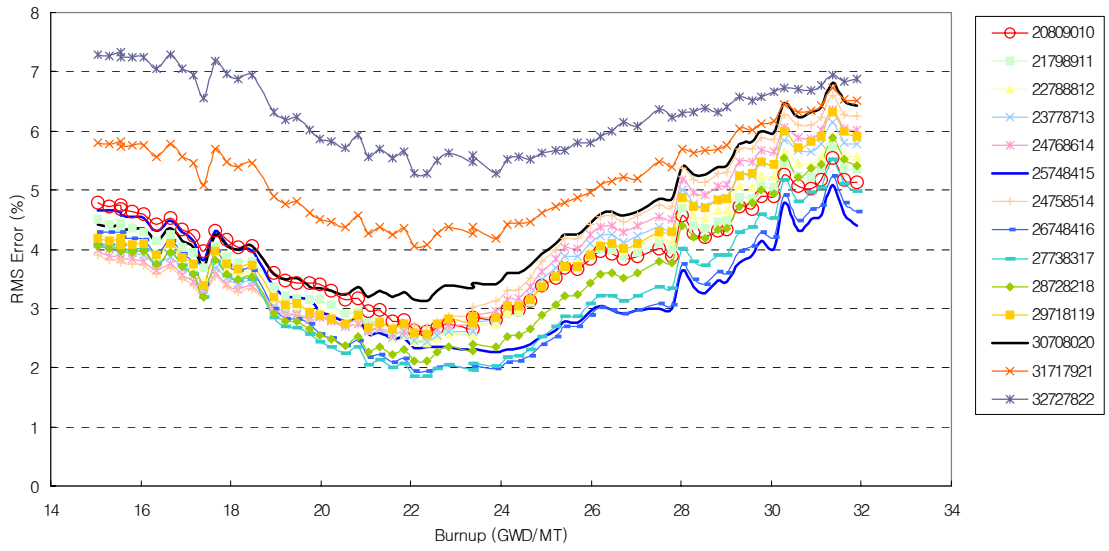


그림 9. 실수 함수세트의 RMS 오차 (영광 3호기 6주기, 채널 B)  
(21798911 -> 2.1, 7.9, 8.9, 1.1)

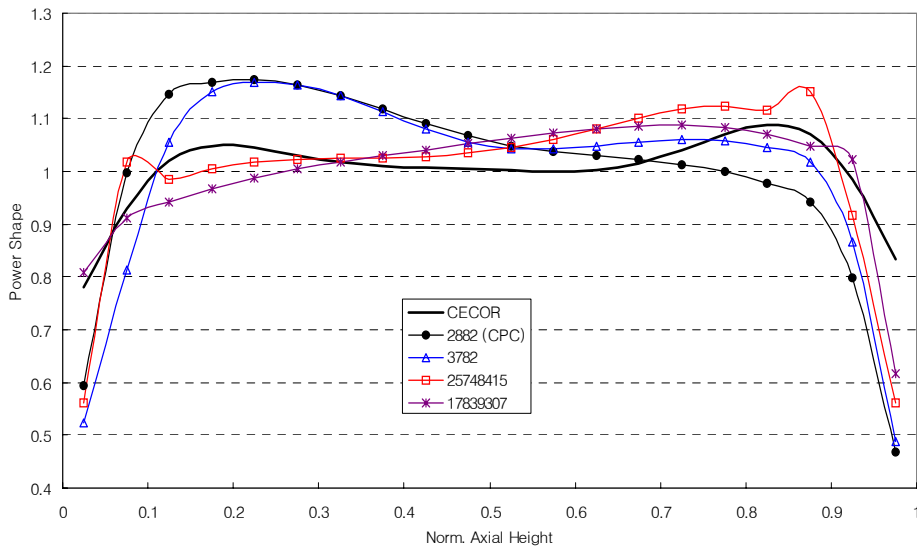


그림 10. 실수 함수세트의 출력분포 (영광 3호기 6주기, 채널 B)

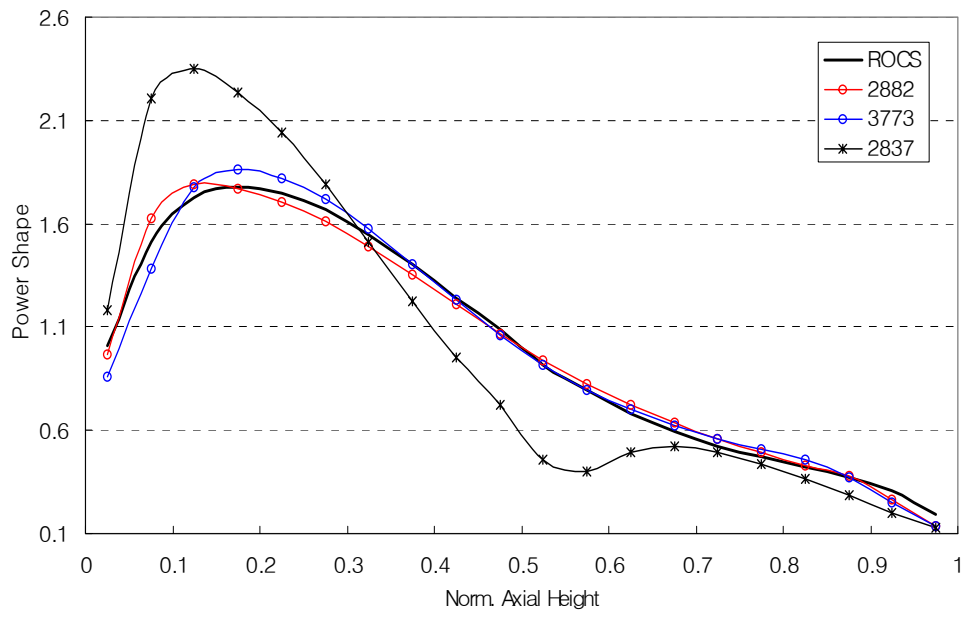


그림 11. 축방향 출력분포 비교 (ROCS)