

## 첨두출력인자 제한치 위배에 대한 원인분석

### Rootcause Analysis for the Violation of Surveillance Q(z)

김재학, 우해석, 정일섭, 김선두  
한전원자력연료주  
대전광역시 유성구 덕진동 493번지

#### 요 약

울진 2호기 11주기 주기초 출력분포 측정시 부하추종운전에 대한 첨두출력인자(Surveillance Q(z))가 제한치를 위배하여 기술지침서에 따라 출력감발 및 RAOC(Relaxed Axial Offset Control) AFD(Axial Flux Difference) 운전영역이 축소되는 제한적인 운전을 하였다. 본 연구에서는 출력분포 측정 자료 및 설계 자료의 분석을 통해 제한치 위배에 대한 원인을 분석하였다. 본 연구 수행 결과 제한치 위배의 주요 원인은 전주기 AOA(Axial Offset Anomaly)로 인한 노심상부 축방향출력(Fz)의 증가이며, 선행제어봉의 제어봉 삽입이 웨스팅하우스형 17x17 발전소에 비해 깊지 않기 때문에 제어봉 삽입시 노심상부(6~8ft)의 첨두출력은 더 높지만 오히려 제한치는 이들 발전소에 비해 낮게 설정되어 있는 것도 또 하나의 원인이라 할 수 있다.

#### Abstract

At the beginning of UCN Unit 2 Cycle 11, there was a violation of surveillance Q(z) limits specified in the Technical Specification, which led to reduction in power level and the reduction of RAOC AFD band. In this study, the cause has been analyzed by reviewing of the measured power distribution and design data. It is found that the major cause was the increase in axial power at top half of the core resulted from the AOA(Axial Offset Anomaly) of previous cycle. Also, in spite of the higher peak power at top half of the core(6~8ft) during rod insertion which is caused by the shallower insertion of the lead bank rather than Westinghouse 17x17 plants, the lower Q(z) limit compared with other plants is another cause.

#### 1. 서론

국내의 웨스팅하우스형 및 프라마툰형 발전소는 정상운전시 월간 단위로 노내핵계측 계통을 이용하여 노심의 출력분포(중성자속 분포)를 측정하고 노심의 안전성에 관련된 제반 변수들이 안전 제한치를 만족하는지 확인하고 있다. 울진 1, 2호기의 경우, 이들 변수중 부하추종운전에 대한 첨두출력인자는 측정된 첨두출력인자에 정상운전중 발생 가능한 과도상태를 고려한 W(z)를 포함하는 변수로 안전 제한치를 만족하지 못할 경우 기술

지침서에 따라 만족 할 때까지 제한적인 운전을 해야 한다.

본 연구의 목적은 최근 울진 2호기에서 발생한 침두출력인자의 제한치 위배에 대한 원인을 분석하는 것이다. 제 2장에서는 제한치 위배의 경위, 기술지침서의 규정, 출력분포 측정 자료 및 설계 자료의 분석에 대하여 기술하였고, 제 3장에서는 제한치 위배의 원인에 대한 결론을 기술하였다.

## 2. 본론

### 2.1. 침두출력인자 제한치 위배 경위

울진 2호기 11주기 주기초 전출력 출력분포 측정시 침두출력인자가 제한치를 1.2% 초과하여 10분후부터 98.8%로 출력을 감발하여 운전하였다. 이후 감발운전 상태의 평형노심에서 측정된 침두출력인자는 제한치를 만족하였으며, 울진 1, 2호기 기술지침서<sup>1)</sup>의 규정에 따라 침두출력인자 제한치 초과분 1.2% 만큼 RAOC AFD 운전영역을 줄여 재설정 한 뒤 전출력 운전을 하였으며, 이때 조정된 RAOC AFD 운전영역은 다음과 같다.

상대 출력(%)	AFD 운전영역(%ΔI)			
	조정전		조정후	
	상한	하한	상한	하한
100	7.8	-11.2	6.6	-10.0
50	27.0	-42.0	25.8	-40.8

### 2.2. 울진 1, 2호기 기술지침서 규정

부하추종운전에 대한 침두출력인자 제한치는 울진 1, 2호기 기술지침서 16.5.3.1.1 및 16.6.9.1.7절을 근거로 하여 평형상태에서 측정된 출력분포에 적절한  $W(z)$ 을 고려한 값이 다음과 같은 기술지침서의 값을 만족하는 지를 확인하는데 사용된다.

$$Q(z) = \frac{Q_{Limit}(z)}{P \cdot W(z)} \quad \text{for } P > 0.5$$

$$Q(z) = \frac{Q_{Limit}(z)}{0.5 \cdot W(z)} \quad \text{for } P \leq 0.5$$

$$\text{여기서, } W(z) = \frac{\text{Transient } Q(z)}{\text{Steady State } Q(z)}$$

$Q_{Limit}(z)$ 는 노심높이의 함수로 나타내어지며,  $W(z)$ 는 정상운전중 발생 가능한 과도상태를 고려하기 위한 값으로 교체노심 안전성 평가보고서<sup>2)</sup>에 나타나 있다.

또한 첨두출력인자가 제한치를 위배하였을 때 제한치를 만족하는 평형노심상태에서  $Q(z)$  초과치 1%당 AFD 운전영역 1%를 축소할 후 출력을 증발시킬 수 있도록 기술지침서 16.4.6.0과 16.5.3.1.1에 규정하고 있다.

## 2.3. 원인분석

### 2.3.1. 첨두출력인자 제한치 비교

프라마톰형 발전소인 울진 1, 2호기의 첨두출력인자 제한치  $Q(z)$ 는 2.45로 동일한 사양의 Vantage-5H(V5H)를 사용하는 웨스팅하우스형 발전소의 2.60에 비해 상대적으로 낮게 설정되어 있다. V5H 핵연료를 사용하는 3-loop 발전소들의 설계 첨두출력인자 및 여유도를 비교해본 결과 그림 1, 2와 같이 울진 1, 2호기의 최대 첨두출력인자는 웨스팅하우스형 발전소에 비해 약 3% 정도 낮지만 최소 여유도면에서는 오히려 3% 정도 더 작은 것을 알 수 있다.

울진 1, 2호기의 노심높이에 따른 첨두출력인자는 노심 중간부까지도 거의 일정하여 노심 상단부(8ft 이상)를 제외하고는 첨두출력인자가 제한치에 근접해 있는 반면 웨스팅하우스형 발전소는 노심높이에 따라 첨두출력인자가 감소하여 노심 중간부(6ft) 이후부터 10% 이상의 높은 첨두출력인자 여유도를 유지하고 있다. 이 같은 현상의 원인으로는 울진 1, 2호기의 선행제어봉인 D-bank가 웨스팅하우스형 발전소 보다 2배 많은 8개로 제어봉가가 크고 출력에 따른 제어봉 삽입이 깊지 않기 때문에 제어봉 삽입시 제어봉 미삽입 위치의 축방향출력( $Fz$ )이 상대적으로 높아  $W(z)$ 에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 웨스팅하우스형 발전소에 비해 울진 1, 2호기의 경우 노심 상단부의 출력이 높은 주기초에는 첨두출력인자 최소 여유도가 작게 된다.

### 2.3.2. 10주기 출력분포 측정자료 분석

울진 2호기 10주기 운전시 측정된 수직출력경사도(그림 3)는 주기초에서 설계치보다 약 2.3% 높게 나타났으나 이후 노심 연소가 진행됨에 따라 설계치보다 더 음의 방향으로 치우치다 연소도 12200MWD/MTU에서 최대 4.9%의 편차를 나타냈다. 이후 주기말까지 수직출력경사도는 설계치에 비해 급격히 증가하여 주기말 (16284MWD/MTU)에서 설계치보다 약 3.0%의 차이를 보이며 노심상부의 급격한 출력증가를 나타내었다. 즉, 10주기는 주기초 이후(연소도 3000MWD/MTU)에서 측정 수직출력경사도가 설계치에 비해 점차 음의 방향으로 치우쳐서 설계치와 최대 편차를 나타낸 뒤 주기말에서 급격히 증가하는 AOA 현상을 나타내었다.

노심 평균뿐만 아니라 영역별, 집합체별 축방향 출력분포도 설계치와 유사한 차이를 나타냈으며, 영역별 집합체 축방향 출력분포(그림 4~6)에 의하면 한번 연소된 L05집합체가 설계치와 가장 큰 편차를 나타냈으며 두번 연소된 K58집합체는 노심 최외곽에 위치하여 가장 작은 편차를 보였다. 그림 5에서 보듯이 주기중반 이후 L05집합체의 상부출

력은 설계치와 큰 차이를 보이며 심하게 왜곡되는 AOA현상을 나타내었다. 이들 대표적인 집합체들의 수직출력경사도 편차를 그림 7에 나타내었으며, 노심내의 모든 노내계측기 위치에서의 각 영역별 수직출력경사도 편차를 그림 8에 보였다. 그림에서 대표적인 집합체들의 수직출력경사도 편차와 영역별 수직출력경사도 편차와는 서로 유사한 결과를 보여주고 있으며, 10주기에서 수직출력경사도 편차를 심화시킨 원인은 L영역 집합체임을 알 수 있다.

### 2.3.3. 11주기 출력분포 측정자료 분석

울진 2호기 11주기에는 L영역의 연료가 장전되지는 않았으나 10주기 신연료인 M영역 집합체들 역시 AOA의 영향으로 핵연료 상부의 연소가 덜 진행된 관계로 주기초 (262MWD/MTU) 측정된 노심 평균 수직출력경사도는 설계치보다 4.9% 높게 나타났으며, 노심중앙의 반경방향 출력도 약 2% 이상 높아졌다.

제한치를 위배한 위치(H/7, Layer 18)에서 첨두출력인자를 구성하는 각각의 항목에 대한 측정치와 설계치는 아래와 같다. 노심 평균치와 같이 제한치를 위배한 위치의 집합체에 대한  $F_{\Delta H}$ 와  $F_{xy}$ 는 설계치보다 약 2% 이상,  $F_z$ 는 4.7% 높아져  $Q(z)$  제한치를 1.2% 초과하였다.

항목	집합체(H/7)		Layer 18(236.22cm)				
	집합체 출력	$F_{\Delta H}$	$F_{xy}$	$F_z$	$Q(z)$	$Q(z)$ 제한치	$Q(z)$ 여유도(%)
측정치	1.404	1.527	1.5387	1.2801	2.1302	2.1055	-1.2
설계치	1.368	1.488	1.4959	1.2227	1.9781	2.1055	6.4
오차(%)	2.6	2.6	2.9	4.7	7.7	-	-

.  $Q(z) = F_{xy} * F_z * 1.05 * 1.03$

.  $Q(z)$  제한치는  $W(z)$ 가 포함된 값

### 3. 결론

국내의 원자력 발전소는 효율을 증대하기 위해 장주기 및 출력증강을 지향하고 있으며, 이로 인해 핵연료의 고농축, 고연소 및 저누출 장전모형을 채택함으로써 집합체 및 연료봉 출력의 증가와 주기초 붕소농도 증가 등이 예견되고 있다. 따라서 AOA의 발생 위험은 더 높아지고, 특히 첨두출력인자 제한치가 타 발전소에 비해 낮은 울진 1, 2호기의 경우 첨두출력인자는 제한치에 더 근접할 수 있다.

출력분포 측정 자료 및 설계 자료를 분석한 결과 10주기 AOA현상으로 인한 11주기 주기초의 노심상부 축방향 출력( $F_z$ )의 증가가 제한치 위배에 가장 큰 영향을 미쳤으며,

특히 웨스팅하우스형 17x17 발전소에 비해 선행제어봉의 제어봉가가 크고 출력에 따른 제어봉 삽입이 깊지 않기 때문에 제어봉 삽입시 노심상부(6~8ft)의 첨두출력은 더 크지만 오히려 제한치는 낮게 설정되어 있는 것이 첨두출력인자가 제한치를 위배한 주요 원인이라 할 수 있다.

#### 참고문헌

1. "Reload Transition Safety Report for Ulchin Unit 1 and 2," May 1995.
2. "울진 2호기 제 11주기 교체노심 안전성 평가보고서," KNF-U2C11-01012 Rev.0, March 2001.

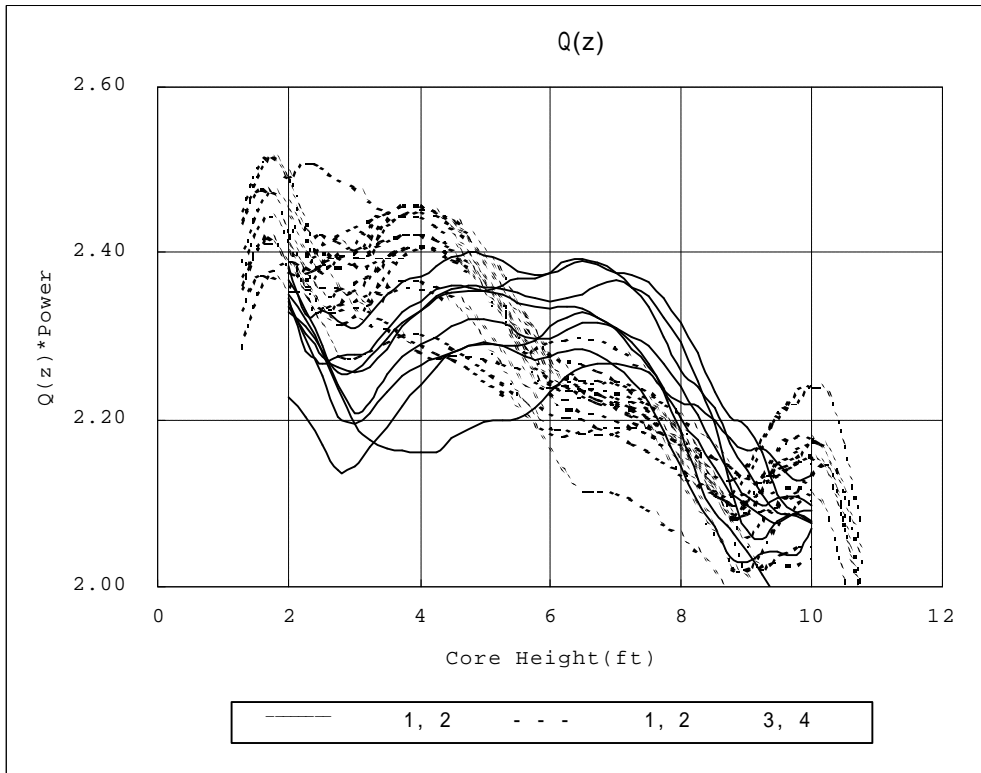


그림 1. V5H 사용 노심의 침투출력인자

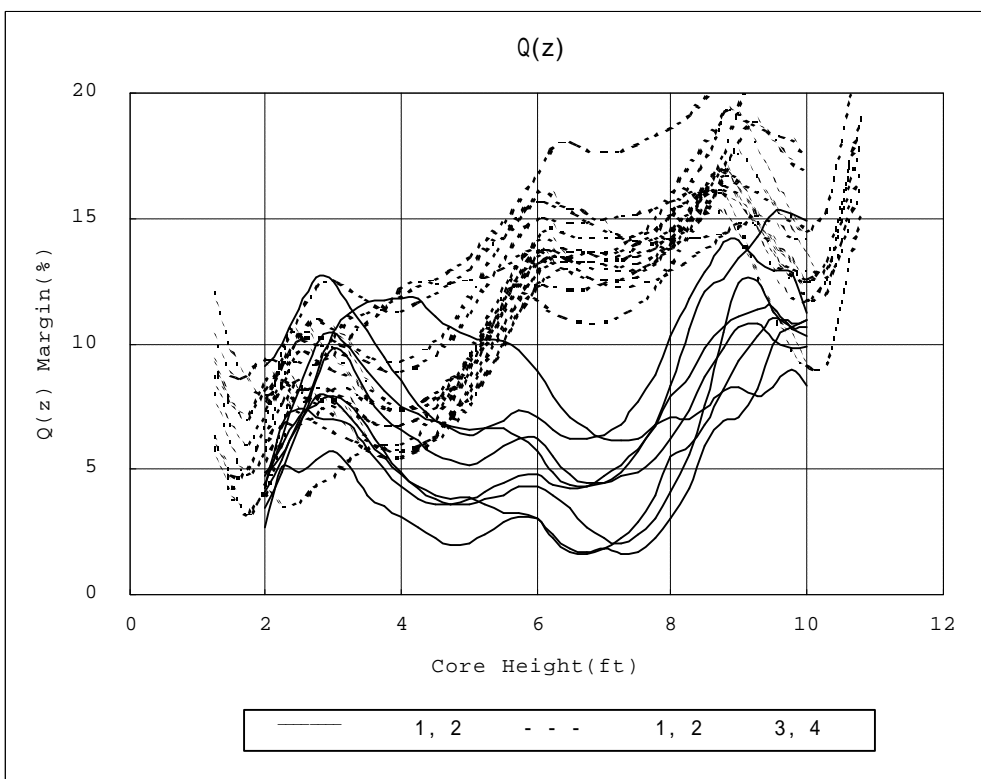


그림 2. V5H 사용 노심의 침투출력인자 여유도

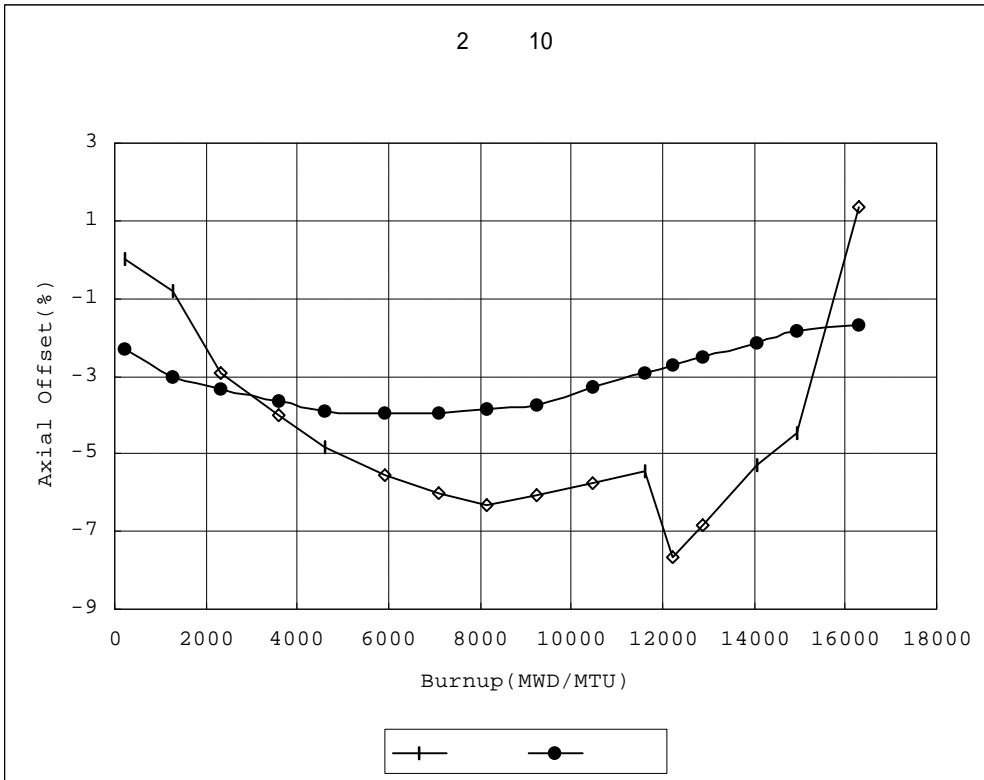


그림 3. 울진 2호기 10주기 수직출력경사도

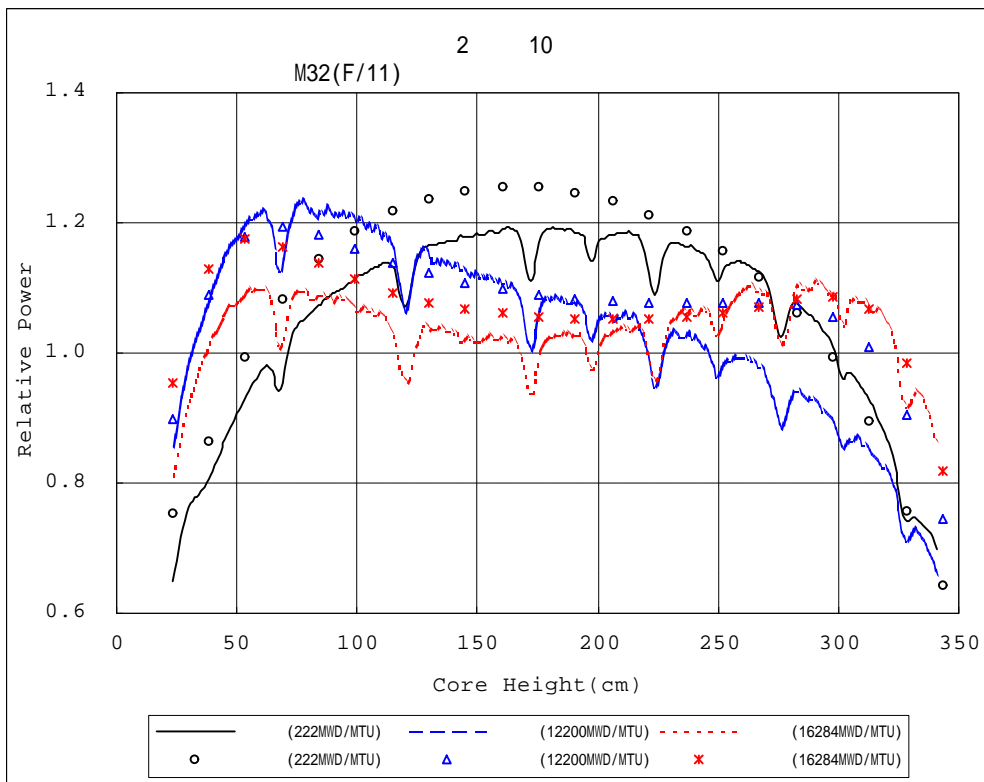


그림 4. 울진 2호기 10주기 M32(F/11) 집합체의 축방향 출력분포

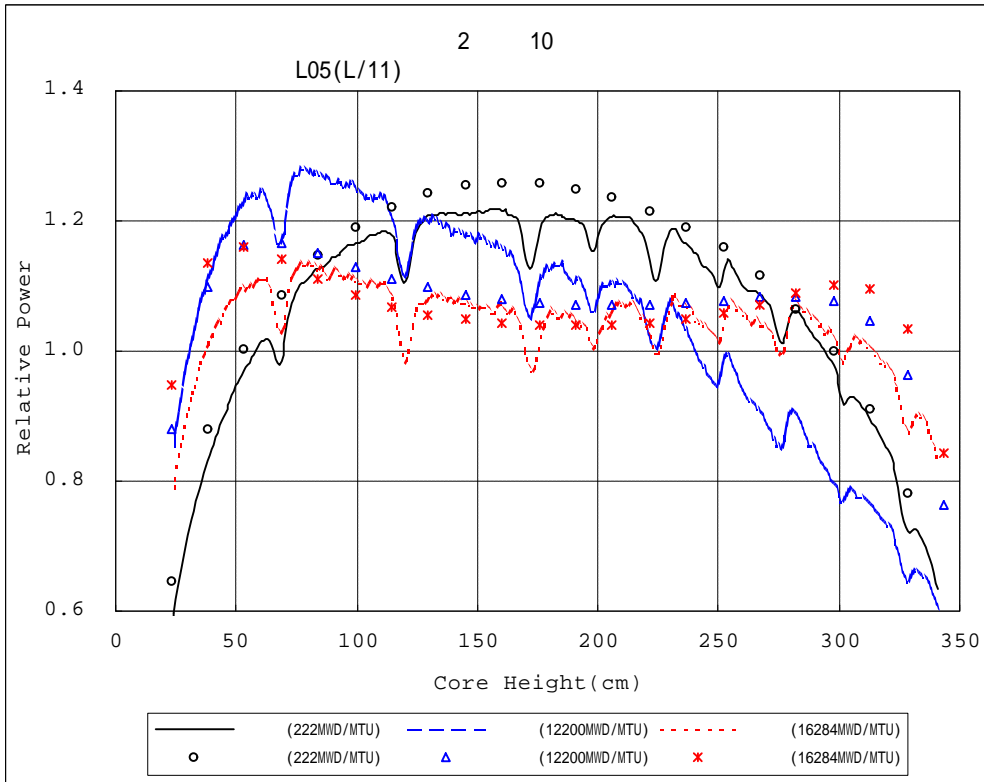


그림 5. 울진 2호기 10주기 L05(L/11) 집합체의 축방향 출력분포

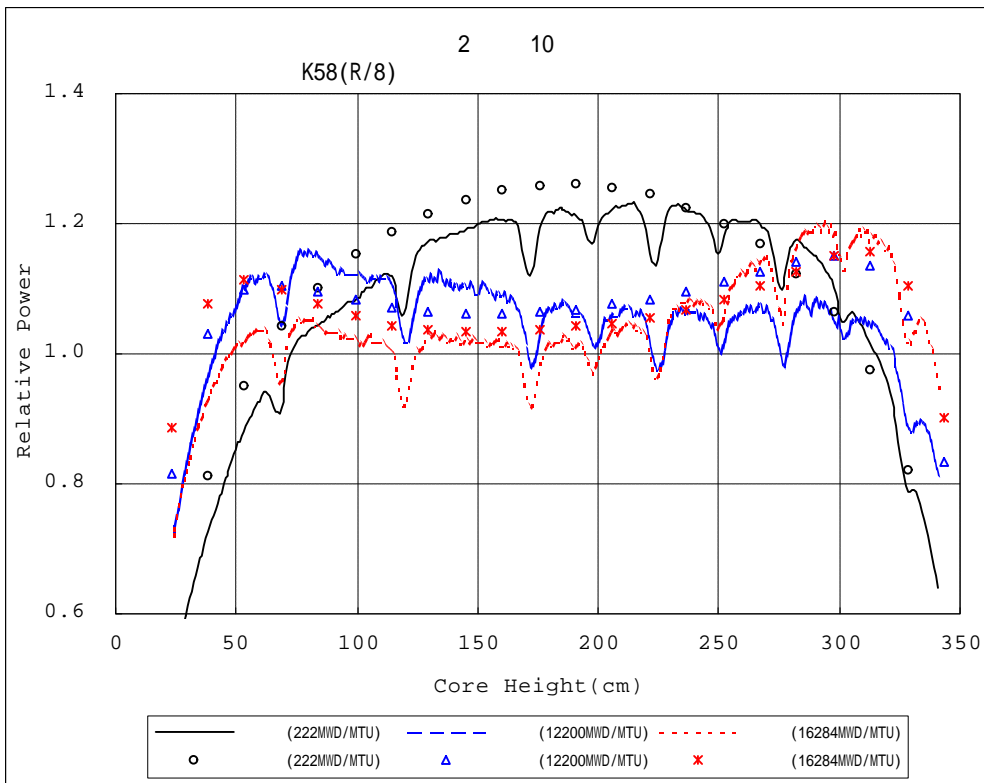


그림 6. 울진 2호기 10주기 K58(R/8) 집합체의 축방향 출력분포



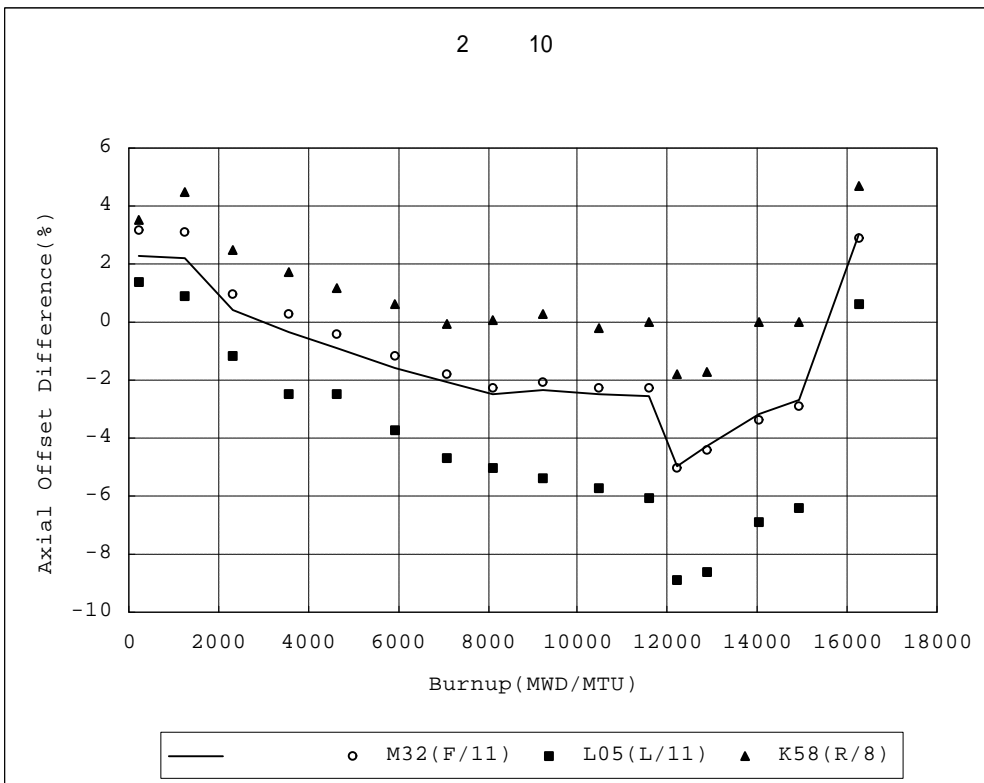


그림 7. 울진 2호기 10주기 수직출력경사도 편차(집합체별)

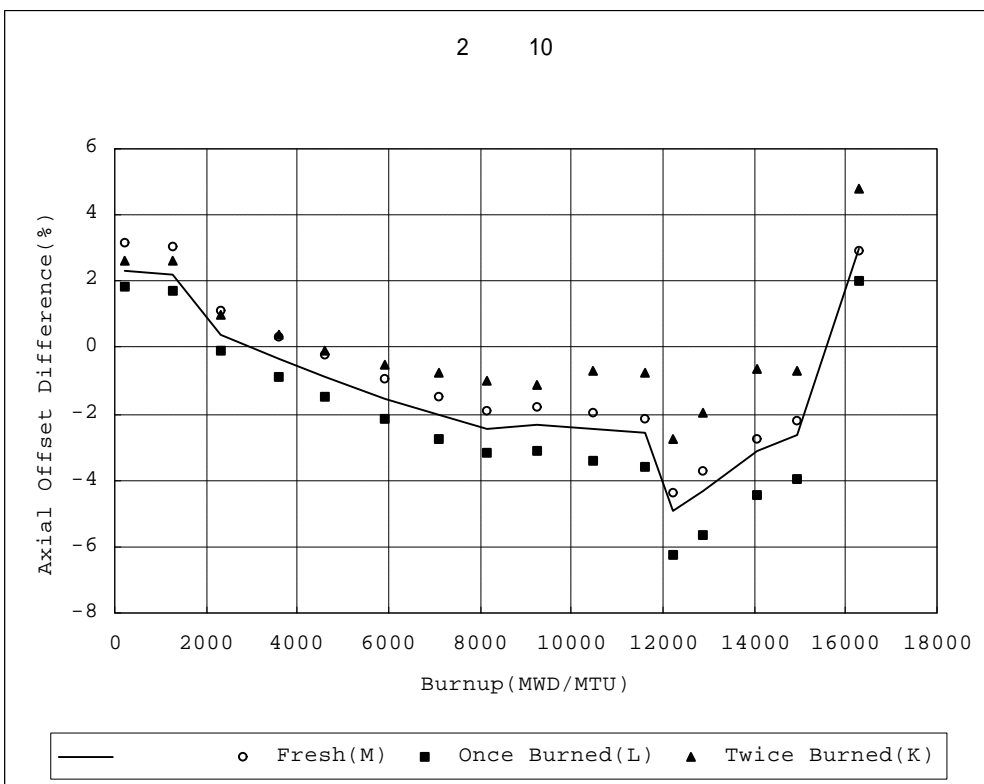


그림 8. 울진 2호기 10주기 수직출력경사도 편차(영역별)