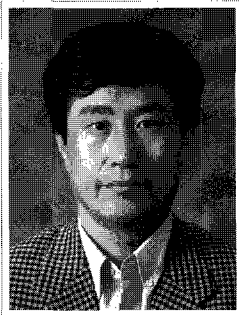


# 한국표준형 원전 교체 노심 설계 절차 개선

박용수

한전원자력연료(주) 노심설계처



## 개요

한전원자력연료(주)는 국내 가압경수로 원전의 모든 교체 노심 설계를 담당하는 기관으로서 특히 한국표준형 원전의 교체 노심 설계는 1997년부터 현재까지 수행하고 있다.

가압경수로 원전의 교체 노심 설계란 대략 18개월을 주기로 이전 주기 원자로심에 사용되었던 핵연

료 집합체의 1/3 정도를 신연료로 교체하여 최적의 경제성, 운전성 및 안전성을 갖는 장전 모형을 선정한 후 이에 대한 핵연료 건전성 및 사고 분석을 수행하고 발전소 운전에 필요한 자료를 생산하여 제공하는 업무를 말한다.

초기 노심 설계 절차에 바탕을 둔 현재의 한국표준형 원전 교체 노심 설계 절차는 초기 노심 설계에 준하는 모든 핵설계 자료를 생산하여, 모든 안전성 분석을 매 주기 수행하고 있고, 설계 부서간 자료 연계 체계가 수작업으로 이루어지고 있으므로 발전소 불시 정지 및 설계 요건 변경에 의한 비상 노심 설계를 단시간에 수행하기가 용이하지 못한 실정이다.

또한 국내 가동중인 한국표준형 원전 수가 매년 증가되고 있어 설계 생산성 향상을 통하여 증가하는 설계 대상 호기를 최적의 설계 요원으

로 수행하는 적극적인 대비가 필요하게 되었다.

한편, 현재 미국 웨스팅하우스사는 한국표준형 원전의 참조 모델인 CE형 원전 교체 노심 설계에 개선된 설계 절차를 적용하여 고도의 설계 생산성을 달성하고 있으므로 향후 원전 연료 시장의 개방 가능성을 고려한 국제 경쟁력 확보 노력이 요구되었다.

이에 따라 한전원자력연료(주)는 2002년부터 2004년까지 2년 6개월간 약 59 Man-Month의 인력을 투입하여 한국표준형 원전 교체 노심 설계 절차 개선을 위한 연구 개발을 추진한 결과, 설계 품질의 극대화화 및 10% 이상의 설계 생산성 향상을 이룩하였다.

## 과거 교체 노심 설계 방법론

교체 노심 설계의 주목적은 주기

〈표 1〉 한국표준형 원전용 핵설계 평가 점검표(PAC) 예

ID PAC_	Parameter Description	Units	Calculated Value
beff(BOC)	Delayed Neutron Fraction (beff), BOC		
bnp_rod_MWDT (CYMAX)	Maximum Axially Integrated Fuel Rod Burnup	MWD/MTU	
cbc_hfp	Maximum critical boron at HFP ARO, Eq. Xe conditions	ppm	
fluence_rod	The peak axially averaged fast fluence (E>1 MeV) at EOC	10 <sup>21</sup> n/cm <sup>2</sup>	
fq_ceaw_hzp (CYMAX)	Maximum Fq for HZP CEA Bank Withdrawal Analysis		
ftc_DRHOSQRK (CYMAX) ftc_DRHOSQRK (CYMIN)	Fuel Temperature Coefficient - Least Negative - Most Negative	Δp/ΔK	
fuelfail_sr	Maximum number of Rod failure computed by Seized (Locked) Rotor for HFP, ARO depletion	%	

불변(cycle-independent) 설계 자료, 설정치(set-point) 뿐만 아니라 기존의 안전 해석이 현주기에 도 여전히 유효한지를 검증하는 것이다.

현재 국내 웨스팅하우스형 원전의 교체 노심 설계는 경계치 해석법(bounding analysis)을 적용하여 안전성 분석을 수행하고 있다.

해당 설계 주기의 핵설계 자료를 생산하여 기존의 안전 해석에 사용되었던 경계치와 비교하는 방법을 사용하기 때문에 일반적으로 별도의 안전 해석이 필요하지 않다.

한편 한국표준형 원전의 교체 노심 설계 방법은 기본적으로는 국내 웨스팅하우스형 원전에 적용되고 있는 경계치 해석법에 바탕을 두고 있으나 상당 부분의 안전 해석을 매 주기 수행하고 있다.

따라서 안전 해석에 필요한 핵설

계 자료의 완전한 세트를 생산하는 상세한 해석이 수반되며, 이를 바탕으로 안전 해석을 수행한 후 안전 해석의 결과를 허용 기준과 비교함으로써 안전성 검증이 이루어진다.

이와 같은 설계 방법론은 매 주기 사고 분석을 수행하기 때문에 상대적으로 많은 인력이 소요되고 한수원의 탄력적인 주기 계획 변경이나 핵연료 손상에 따른 비상 노심 설계를 수행하기가 용이하지 않은 문제점을 갖고 있다.

### RPI 방법론

미국의 웨스팅하우스사가 개발한 RPI(Reload Process Improvement) 방법론의 특징은 경계치 접근법의 이용을 통한 매 주기 상세 해석의 생략, 점검표(Checklist)의 활용과 계산 및 평가 작업의 자동화

가 그 특징이다.

점검표는 그 용도에 따라 다음과 같이 분류된다.

- 핵설계 평가 점검표(PAC, Physics Assessment Checklist) : 매 주기 점검해야 할 핵설계 변수 목록 (〈표 1〉 참조)

- 핵설계 안전 점검표(EPAC, Equivalence Table for PAC) : 안전 해석과 설정치 해석에 사용되는 모든 핵설계 변수 목록 (〈표 2〉 참조)

- 비핵설계 안전 점검표(NPAC, Non-Physics Assessment Checklist) : 매 주기 점검해야 할 발전소 구성 정보 목록

- 포괄 점검표(CCL, Comprehensive Checklist) : 안전 해석과 설정치 해석에 사용되는 모든 변수 목록

- PAC 적용 가능성 기준 (APAC

〈표 1〉 한국표준형 원전용 핵설계 안전 점검표(EPAC) 예

Item	Parameter Description	Limiting Value	Correlated to PAC Parameter
1	Generic Data		
1.1	Moderator Temperature Coefficient (MTC)		
	1. Most Positive MTC during cycle CORE_mtc_pos_DRHOF(CYMAX)		1. mtc_hzp_DRHOF(BOC)
	2. Most Negative MTC during cycle CORE_mtc_neg_DRHOF(CYMIN)		2. mtc_hfp_DRHOF(EOC)
	3. MTC versus core power		mtc_hfp_DRHOF(BOC) mtc_p75_DRHOF(BOC)
1.2	Fuel Temperature Coefficient (FTC) including uncertainties		
	1. Least negative FTC: CORE_ftc_DRHOSQRK(CYMAX)		1. ftc_DRHOSQRK(CYMAX)
	2. Most negative FTC: CORE_ftc_DRHOSQRK(CYMIN)		2. ftc_DRHOSQRK(CYMIN)
	3. Reactivity vs. Fuel Temp.		
1.3	Kinetics Parameter		
	1. Maximum $\beta$ and associated decay constants ( $\lambda$ ) CORE_beff(CYMAX)		1. beff(BOC)
	2. Minimum $\beta$ and associated decay constants ( $\lambda$ ) CORE_beff(CYMIN)		2. beff(EOC)
	3. Maximum prompt neutron lifetime ( $t^*$ ) CORE_lstar(CYMAX)		3. lstar(EOC)
	4. Minimum prompt neutron lifetime ( $t^*$ ) CORE_lstar(CYMIN)		4. lstar(BOC)

, Applicability Criteria of PAC)  
: PAC 적용이 가능한 노심인지를  
사전에 점검하기 위한 변수 및 기준  
치 목록

이와 같이 점검표를 이용한 방법  
은 안전 해석을 완전히 재해석할 필  
요 없이 기존의 안전 해석이 유효한  
지를 입증하는 간단한 방법이다.

즉, 점검표의 각 항목에 대하여  
적절한 보수성을 고려한 설계치를  
결정하고, 안전 해석에 사용되었던

제한치와의 비교를 통하여 안전성  
을 입증하는 것이다.

RPI 방법론은 웨스팅하우스사가  
설계하는 미국의 Palo Verde,  
Arkansas, Waterford 등 CE형  
원전에 대해 최근까지 성공적으로  
적용을 해오고 있다.

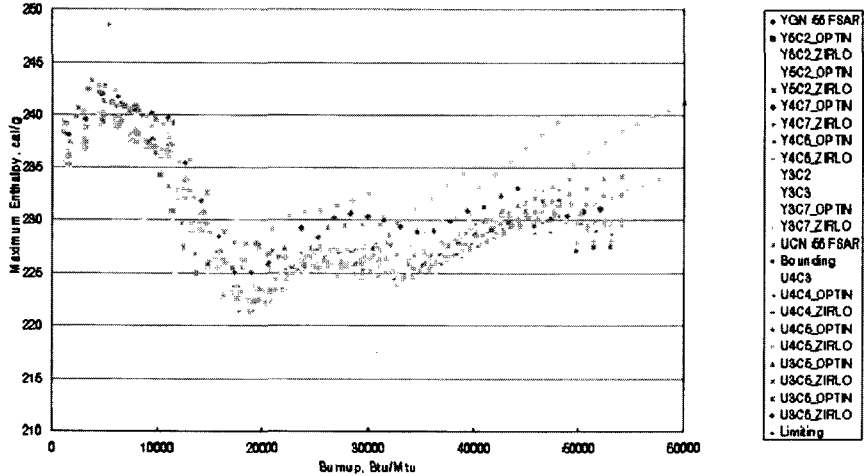
**경계치 해석 및 설계 절차 개선**

한국표준형 원전에 RPI 방법론

을 적용하기 위해서는 다양한 노심  
조건에 따른 경계치 해석이 우선되  
어야 한다.

PAC 제한치를 설정하기 위해 핵  
설계 변수의 유효성과 민감도 분석  
을 수행하였고 이를 바탕으로 〈표  
1〉과 〈표 2〉와 같은 핵설계 평가  
점검표와 핵설계 안전 점검표가 구  
성되었다. 〈그림 1〉은 제어봉 이탈  
사고에 대한 경계치 해석을 보여주  
고 있고, 〈그림 2〉는 연료봉 내압

Maximum Centerline Enthalpy during CEAE for HFP



〈그림 1〉 제어봉 이탈 사고에 대한 경계치 해석

설계 기준을 만족하는 Radial Fall-off Curve 경계치 값을 보여 주고 있다.

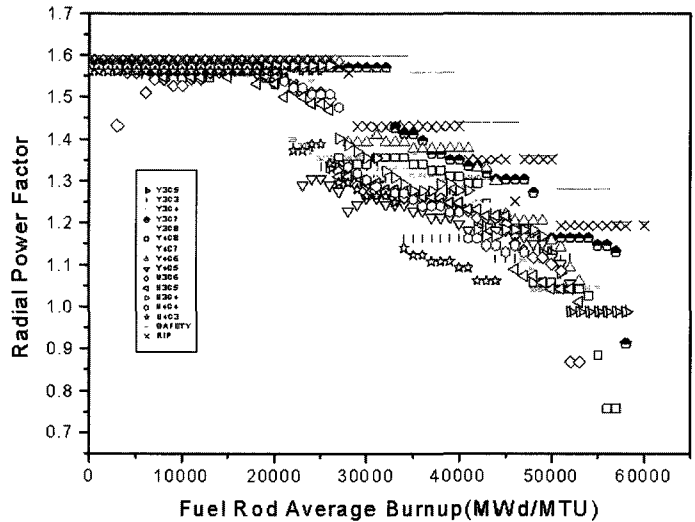
이와 같은 경계치 해석과 이를 바탕으로 한 점검표 작성이 이루어짐으로써 한국표준형 원전 교체 노심 설계 절차가 개선되었다.

**계산 및 평가 작업의 자동화**

원자로심의 핵물리적 특성을 분석하는 핵설계 평가 업무를 수행하기 위해서는 복잡한 3차원 모델링과 많은 종류의 전산 코드가 필요하다.

즉, 정확한 모델링과 전산 코드의 실행 및 데이터의 처리 등에 많은 시간과 노력이 들게 된다.

따라서 설계자의 수작업을 줄이



〈그림 2〉 경계치 해석에 사용된 봉출력 이력과 기존 교체 노심의 봉출력 비교



〈그림 3〉 문서 중심 설계

```

<html>
<head>
<title>IDP Test</title>
<meta name="keywords" content="IDP, final parameter" />
<link rel="File-List" href="/IDPtest.files/filelist.xml" />
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="http://koyu/css/IDP.css" />
</head>
<body>
<pre class="APformula-hide">
docnumber="foo"
num=5
</pre>
<p class="MsoNormal">Appendix to #docnumber#</p>
<br class="PageBreak" clear="all" />
<pre class="APif" num = 3 />
  <pre class="APfor" >
    INDEX=1 ; INDEX(<=num ; INDEX++</pre>
  <pre class="APsubmit-hide">
    gnuplot(plot.inp</pre>
  <pre class="APimage">
    plot.eps 1 2.3 4 4.2 A4</pre>
  <br class="PageBreak" clear="all" />
  <pre class="APendfor">End of APfor loop</pre>
  <pre class="APendif">Bottom of APif Block</pre>
</body>
</html>
    
```

〈그림 4〉 HTML 형태의 동적 문서

고 설계 품질과 생산성을 향상시키기 위한 많은 노력이 진행되어 왔다.

이를 위해 한전원자력연료(주)는 IDP(Innovative Design Processor)라는 진보된 설계 자동화 시스템을 설계하고 구현하였다.

IDP는 설계자로 하여금 모든 설계 작업을 쉽게 할 수 있도록 도와주는데, 문서 중심 설계(document-oriented design)와 웹 기반 설계(web-based design) 라는 두 가지 기본 원리를 바탕으로 하고 있다.

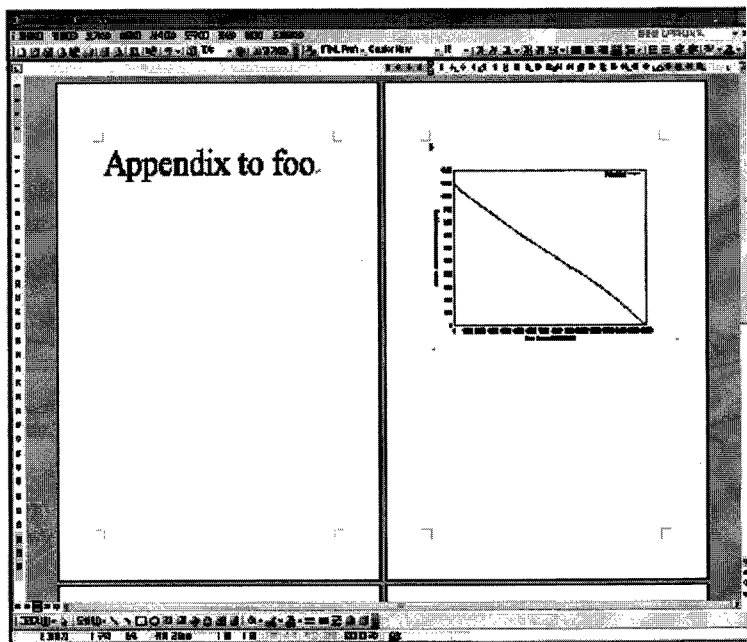
**문서 중심 설계**

문서 중심 또는 문서 지향 설계란 설계자가 전산 코드의 입력보다는 설계 문서 작성에 초점을 맞추는 것이다.

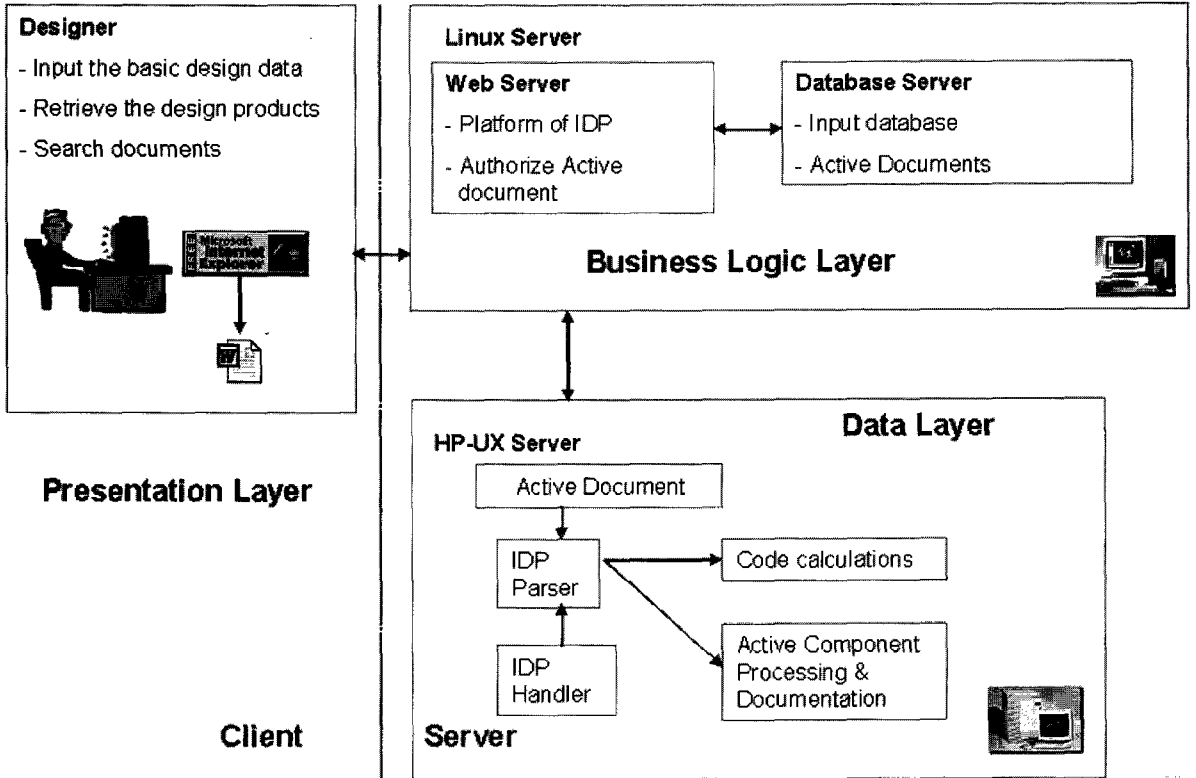
즉, 설계자가 원하는 설계 문서의 초안을 작성하여 이를 특수 프로그램이 실행하도록 하면 설계 관련 일체의 결과값과 표와 그림 등이 담긴 최종 설계 문서를 자동적으로 얻게 되는 것이다(〈그림 3〉 참조).

모든 설계의 최종 결과는 문서화 되어야 하므로 이와 같은 접근 방법은 설계자의 문서화 작업 부담을 크게 덜어준다.

또한 설계자는 문서를 편집할 수 있기 때문에 프로그래머의 도움없이 설계 절차의 변경에 맞게 문서를



〈그림 5〉 최종 문서



〈그림 6〉 IDP의 전체 아키텍처

수정할 수 있다.

이 문서는 일반적인 형태의 문서가 아니라 동적 문서(active document)라고 한다.

〈그림 4〉와 같이 HTML(Hypertext Markup Language)로 작성한 동적 문서를 파서(parser)라는 프로그램이 처리하도록 하면, 동적 문서는 MS Word로 열었을 때 〈그림 5〉와 같이 원하는 최종 문서로 변화되는 것이다.

### 웹 기반 설계

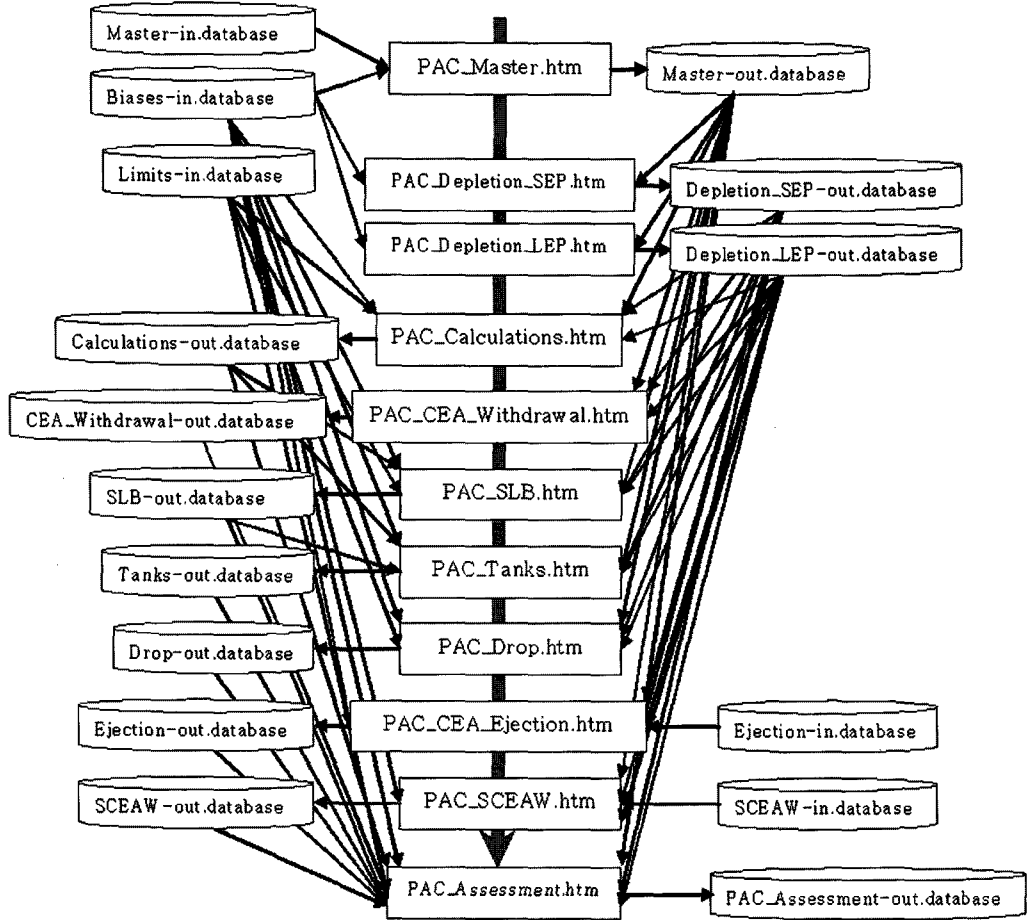
동적 문서는 마이크로소프트 윈도우 운영 체제에서 작성하고, 문서 처리는 유닉스 시스템에서 이루어지는 것이 일반적인 상황이다.

따라서 이러한 다중 운영 체제 환경에서 모든 동적 문서를 생성, 실행 및 관리할 수 있는 시스템이 존재한다면 사용자의 편의성은 극대화될 것이다. 이것이 웹 기반 설계 시스템이 개발된 이유이다.

1990년대 말 이래로 한전원자력연료(주)는 웹 기반 설계 자동화 시스템을 개발하여 왔으며, 여기에 문서 중심 설계 개념을 도입함으로써 IDP의 아키텍처가 완성될 수 있었다. 〈그림 6〉은 IDP의 전반적인 아키텍처이다.

### 핵심 설계 평가 결과

이와 같이 설계하고 구현된 IDP를 통해 한국표준형 원전의 교체 노



〈그림 7〉 핵설계 평가 계산 흐름도

심 안전성 평가를 위한 핵설계 평가 (PAC) 작업을 〈그림 7〉과 같이 수행한 결과 수작업으로 진행했을 경우 10% 이상의 설계 생산성 향상이 이루어졌다.

**결론 및 향후 추진 계획**

이는 기존 수작업에 의해 생산된

결과와 비교할 때 생산 속도와 품질 면에서 월등한 결과임을 의미한다.

따라서 설계 품질의 극대화와 10% 이상의 설계 생산성 향상이라는 소기의 목적을 달성하여 향후 원전 연료 시장의 개방에 대비한 국제 경쟁력을 확보하였다.

한전원자력연료(주)는 여기에 머무르지 않고 설계 절차의 지속적인

개선과 IDP의 고도화를 위해 2005년부터 2006년까지 한국표준형 원전 교체 노심 설계 절차 개선(II) 과제를 진행중에 있다.