

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## PC를 이용한 가압경수로의 핵주기 분석용 시뮬레이터 개발

노성열, 황원국

경희대학교

### 요 약

가압경수로심의 주기별 장전 모형을 사용자 정의 환경에 의해 시뮬레이션 함으로써 적절한 장전 모델을 결정할 수 있도록 시뮬레이터(Win-Scope)를 개발 하였다. Win-Scope는 ZION 발전로에 의해 검증되었다. 고리 1호기 원자로에 적용하여 고리 운전기록과 비교한 결과 출력 분포는 로심 중앙 부분은 대체로 근접 하였으나, 로심 외각 부근에서는 비교적 차이가 크게 나타났다.

#### 1. 배경

본연구는 핵연료의 선택과 그에 의한 최적의 배열을 찾는 시뮬레이터 개발에 목적을 두었으며, 주기 계산은 로심의 구조와 구성, 중성자 및 열수력학적 측면, 반응도 제어 측면등 많은 부분들을 고려해야 하므로 최적의 핵연료 집합체 배열은 복잡하다. Win-Scope의 특징은 우선 재장전 시 반복되는 코드 실행 계산을 간단하게 해주며, 재장전 시에 집합체 변경 및 새 핵연료 선택 장전 등이 자유롭다. 또한, 여러 가지 계산 코드를 다양하게 선택 실행 할수 있으며, 결과를 수치 및 그래픽적으로 볼 수 있어 오차 및 peaking에 관한 고찰이 용의하다. 기본 라이브러리에 cubic spline 내삽법을 적용하여 연소도에 따른 균정수 값들을 만들어준다. 끝으로 시뮬레이터의 실행이 윈도우 환경에서 마우스만으로 가능하므로 PC에 익숙하지 않은 핵공학 전공자나 로심설계에 관해 익숙하지 않아도 쉽게 사용할 수 있다. 로심에 재장전된 핵연료로 인하여 원자로가 정지되는 경우는 드물며, 특히 부분적으로 새로운 핵연료로 교체되는 상업로에서는 더욱 흔치 않다. 주기말에서 새 핵연료를 교체함에 있어서 다음 사항들을 고려해야 한다.

- 1) 고 농축도를 가지는 작은 배치의 선택

- 2) 저 농축도를 가지는 큰 배치의 선택
- 3) 고정된 배치 주기와 고정된 농축도에 의한 핵연료 주기의 확립
- 4) 예상되는 주기 시간 동안 운전되어야하는 핵연료 농축도의 결정
- 5) 출력 분포를 고르게 하기위한 독봉의 장전과 반응도 조절의 필요

위의 사항들을 고려하고 발전 단가를 낮추기 위해서 일반적으로 가장 중요한 방법은 핵연료의 농축도별 종류를 줄이는 것이며, 재정전 로심 계산에 걸리는 시간을 줄이는 것인데, 이런것들은 로심 재장전에 가장 중요한 결정 요인이다. 따라서 Win-Scope을 이용하여 시간적 절약은 물론 위의 여러 상황 등을 고려하여 재장전 할 수 있다. Win-Scope은 Bohnhoff<sup>1)</sup>가 개발한 SUNFAST 를 1차 단계로 PC 환경에서 이용 가능하도록 완전 재 프로그램 되었다.

## 2. Win-Scope 설명

### 가. Win-Scope 구조

Win-Scope은 윈도우 환경의 개인 컴퓨터용으로 개발된 가압 경수로의 재장전 주기 계산용 시뮬레이터이다. Win-Scope의 전체 화면 구성은 그림 1과 같고, 그림에서와 같이 집합체가 그려지는 영역, 버튼 영역, 계산 방식 선택 영역 그리고 결과 화면으로 나누어진다. 집합체에는 농축도와 가연성 독봉 갯수가 나타내지며, 선택에 의해  $k_{\infty}$  값이나, 연소도 값을 볼 수 있고, 각 집합체별 이동은 물론 자료도 볼수 있다. 결과 화면에서는 출력과 연소도별 분포도가 그래픽적으로 처리된다. Win-Scope 전체 구조와 파일 구조는 그림 2와 같다. 우선 모듈별로 살펴보면,

1. control module : 계산 코드와 방식 선택 및 화면 표시 모듈로 Win-Scope 전체를 조절 한다. 이 모듈에서는 재 생산된 2군정수 값과 보론 농도에 의해 statepoint 계산이 반복 실행된다.
2. filelist module : popup 윈도우에 의해 나타나며, 초기 집합체의 배치 파일들인데, 주기별 전체적 장전을 하며, 에디터 버튼으로 수정 할 수 있다.
3. parameter module : popup 윈도우에 의해 나타나며, 계산 정확도와 초기 보론 농도, 연소 단계, 그리고 가산치를 설정해 주는 모듈이다.
4. assy\_change module : 로심 재 장전 및 적절한 장전을 위해 집합체의 위치 변경과 새 핵연료 장전에 관한 모듈이다.
5. assy\_data module : 핵연료의 농축도,  $k_{\infty}$  값, 연소도 값 가연성 독봉의 개수 상태 등 집합체 별 자료를 나타내주는 모듈이다.
6. results module : 코드에 의해 계산된 결과를 출력하는 부윈도우로서, 출력 분포 및 그래픽 화면, 연소도 분포 및 그래픽 화면,  $k_{\infty}$  값 등을 나타내준다.
7. input\_file module : Borresen이나 Map2 등의 코드가 실행되기 위한 입력문이며, 여기에는

로심 구조, 2군 정수 및 기타 변수를 설정해 주며, 조절 모듈과 변수설정 모듈로 변경된다.  
 단면적 자료는 super cell 모델의 연소도별 자료를 기본으로 하며, 연소가 진행됨에 따라 이에 맞는 값으로 변하며, 라이브러리에 없는 연소도에 해당되는 값은 cubic spline 내삽법에 의해 구해진다.

#### 나. 실행

연소도 계산은 각각의 2군 정수들에 의해 계산되어 지는데, Win-Scope는 핵연료의 농도, 가연성 독종의 입출 상태 의해서 핵연료형을 결정한 후, 각각의 핵연료 유형별 연소도 계산이 두개의 순간적 0-500 ppm 사이의 보론 농도에 의해서 결정되며, 핵연료 계산에 있어서 필요한 군정수들은  $D_1, D_2, \sum a_1, \sum a_2, \sum_{i=1}^2, \nu \sum r_1, \nu \sum r_2, \nu, k_{\infty}$  이 있다. Win-Scope에서 위의 값들을 생성하기 위해서 super cell 계산으로 라이브러리인 핵연료 연소도별 2군 정수를 만들어내며, 이것으로 각각의 계산 방법에 따라 그에 맞는 반복 계산법에 의해 연소도가 계산되어진다.

#### 다. 계산기능 선택

- statepoint : 로심  $k_{eff}$  값과 출력분포에 비례한 전체 로심의 중성자 속을 구하는 계산기능이다. 출력분포와  $k_{eff}$  값을 보고 연소된 후의 연소도 출력분포와  $k_{eff}$ 를 예상할 수 있어 미리 적절한 장전 모형을 설정하므로 시간을 줄일 수 있다.
- boron concentration : statepoint의 반복 계산에 의해서 구해지는, 임계 보론 값을 구하는 계산기능이며, 이 값에 의해서 EOC 계산이 된다.
- end-of-cycle : 초기에서 주기 말까지 단계별 집합체 마다의 연소도를 계산하며, 연소도 단계가 0.01 GWD/MTU 이거나, 보론 농도가 1.0 ppm 이하일 경우에 멈춘다.
- EOC : 위의 end-of-cycle 와 비슷한 계산 값을 얻지만, end-of-cycle을 계산함에 있어서 각 단계마다 임계 보론 값을 찾아 가면서 계산해 주므로 많은 시간이 요구된다.

#### 라. 재장전

재장전은 에디터에 의한 재장전도 가능하며, 화면에서 집합체별 재장전도 가능하다. 또한 다양한 새핵연료 선택 및 장전도 가능하다. 재장전 실행후 결과를 바로 확인후 다시 재장전 해서 적절한 재장전 위치를 결정할수 있다.

### 4. Win-Scope의 검증

#### 가. SUNFAST와 Win-Scope의 비교

SUNFAST는 Bohnhoff 등에 의하여 제공된 SUN workstation 환경의 가압경수로 재장전 주기 분석용 개발 툴로, 원래 환경의 모든 경우에 대하여 시뮬레이션 하였을때의 결과값이 pc-486용 윈도우 환경의 Win-Scope 결과값과 비교하여 모든 경우에 SUNFAST와 Win-Scope는 정확히 일치하였다.

#### 나. 고리 1호기에의 적용 및 결과

고리 1호기 제7주기를 검증하였다. 그림 3은 Win-Scope의 실행 결과를 실제 고리 1호기의 연소도 값과 비교한 것이다. 재장전에 따른 집합체 배치는 고리 1호기를 바탕으로 하였으며, 모든 장전은 고리 1호기 실제 장전모형을 따랐으나, 코드 자체가 1/4 로심 계산 코드가므로 대칭에 의한 재장전 방식을 적용한 집합체도 있다. Win-Scope으로 계산한 값인 그림 3(a)는, statepoint로 계산한 출력분포 값으로 연소한 후의 분포도를 예측하는데 사용된다. 그림 3(b)는 고리 1호기의 보론 농도를 그대로 사용하여 계산한 end-of-cycle 값이며, 그림 3(c)는 EOC로 계산한 연소도 분포이다. 또한 그림 3(d)는 임계 보론 값을 구하여 그 값으로 계산한 end-of-cycle 값이다.

#### 5. 결 론

이미 논의한 바와 같이 ZION의 경우에 SUN Workstation의 환경의 SUNFAST와 윈도우 환경의 Win-Scope의 시뮬레이션 결과가 정확히 일치하지만, 고리 1호기에 적용한 예에서 보는 바와 같이 실제의 운전 자료와는 크게 상이함을 알 수 있다. 이러한 차이는

- (1) 고리 실제 운전 이력(재장전 위치등)을 따르기 위하여서는 1/4 로심이 부적절한 점
- (2) Win-Scope의 라이브러리는 ZION 핵연료에 대하여 생산되어 고리 발전로에는 부적절한 점 등에 기인한다고 보고 있다. 따라서 일반적인 가압 경수로 핵연료 주기 분석에 Win-Scope를 활용하기 위해서는 계산 모듈의 개선과 아울러 핵자료 라이브러리의 개선이 필요할 것으로 보인다.

#### 참고문헌

1. Bohnhoff, William Joseph, SUNFAST : A Sun Workstation Based, Fuel Analysis Scopeing Tool for Pressurized Water Reactors, Ph.D. 논문 Texas A&M 대학교, 1991
2. Petzold, Charles, The Microsoft guide to writing applications for Window 3.1, Microsoft corporation, 1993
3. Conger, James L., Windows API Bible, Wait Group, 1992
4. 박현수, 내손으로 짜는 윈도우 프로그래밍, 에스컴, 1994
5. 한국전력공사 기술연구원, 가연성 독봉 사용방법 최적 연구, 1993

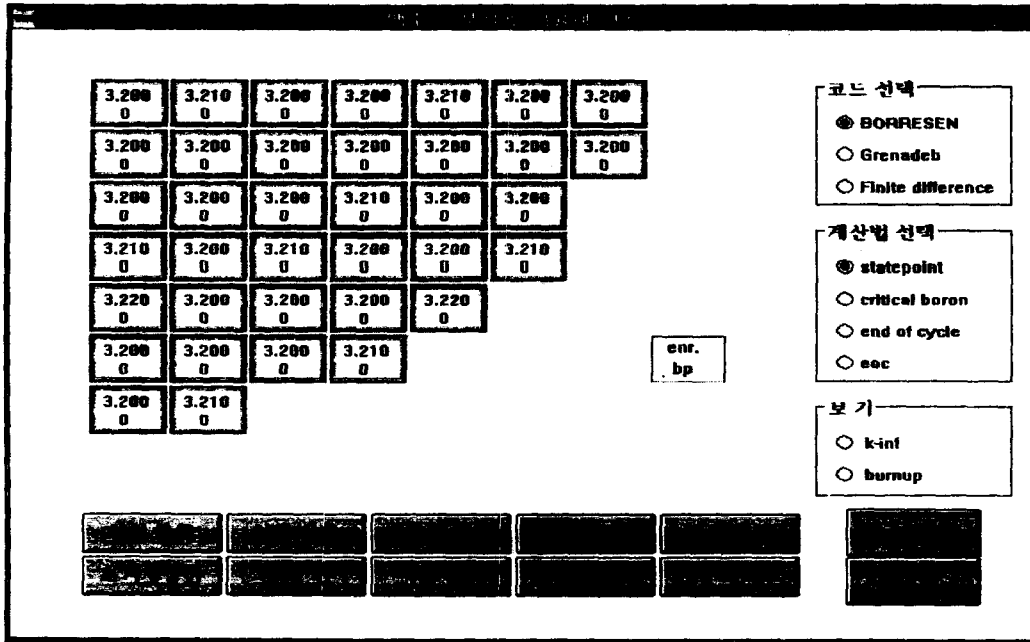


그림 1. Win-Scope의 기본 화면

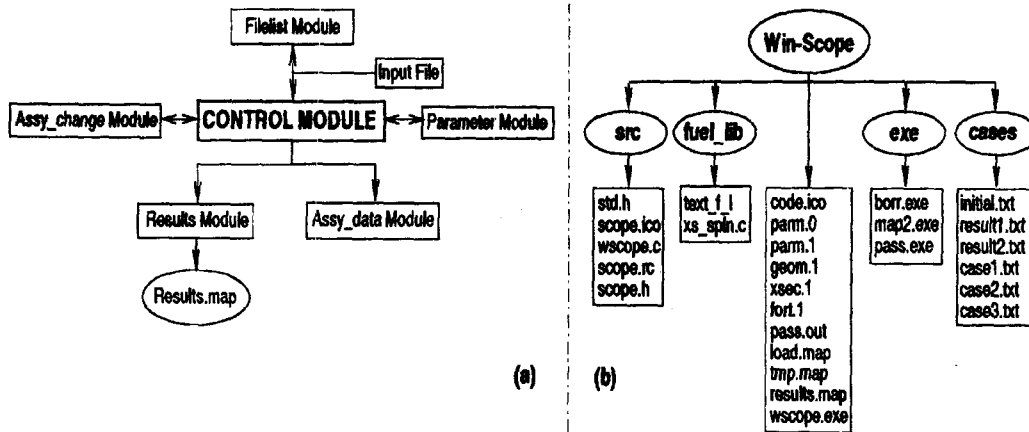


그림 2. Win-Scope의 구조

0.525	0.511	0.646	0.692	1.056	2.220	1.310
0.511	0.647	0.637	0.859	1.221	1.980	0.723
0.644	0.635	1.114	0.815	1.108	1.313	
0.688	0.857	0.811	1.058	1.145	0.517	
1.044	1.212	1.108	1.139	0.437		
2.167	1.930	1.313	0.521			
1.258	0.664					

출력

(a) statepoint 계산

25.62	33.41	25.26	34.92	36.66	17.81	10.67
29.58	31.38	23.55	33.70	34.91	11.51	7.26
0.866	1.065	1.073	1.036	1.050	1.547	1.470
33.53	21.10	37.93	23.32	25.89	16.68	25.44
31.50	18.93	36.15	21.53	23.53	11.60	25.58
1.064	1.115	1.049	1.083	1.100	1.438	1.112
25.27	37.97	16.92	37.71	24.96	12.61	
23.50	36.11	12.74	35.63	22.92	9.16	
1.075	1.052	1.328	1.058	1.089	1.380	
34.88	23.26	37.83	22.16	13.83	30.51	
33.49	21.43	35.73	19.63	10.74	28.91	
1.042	1.085	1.059	1.129	1.288	1.055	
36.37	25.69	24.94	13.82	31.94		
35.01	23.58	22.93	10.74	31.30		
1.039	1.089	1.088	1.287	1.020		
17.72	16.56	12.64	30.55			
11.50	11.62	9.21	28.80			
1.541	1.425	1.372	1.061			
10.46	31.76					
7.25	30.02					
1.441	1.058					

Win-Scope  
고리 1호기  
비교치

(b) end-of-cycle 계산

26.08	33.78	25.36	34.63	35.87	20.06	11.96
29.58	31.38	23.55	33.70	34.91	11.51	7.26
0.882	1.076	1.077	1.028	1.027	0.888	1.743
33.92	21.48	37.99	23.01	25.20	18.24	28.13
31.50	18.93	36.15	21.53	23.53	11.60	25.58
1.077	1.135	1.051	1.069	1.071	1.572	1.100
25.45	38.09	37.05	37.37	24.39	13.27	
23.50	36.11	35.73	35.63	22.92	9.16	
1.083	1.076	1.037	1.038	1.064	1.449	
34.68	23.08	37.58	21.89	13.66	30.17	
33.49	21.43	35.73	19.63	10.74	28.91	
1.036	1.087	1.052	1.116	12.72	1.011	
35.62	25.11	24.37	13.68	31.63		
35.01	23.58	22.93	10.74	31.30		
1.021	1.065	1.063	1.010	1.011		
19.30	17.62	13.27	30.22			
11.50	11.62	9.21	28.80			
1.678	1.516	1.441	1.049			
11.33	31.35					
7.25	30.02					
1.563	1.044					

Win-Scope  
고리 1호기  
비교치

(c) EOC (보론 1335ppm)

25.52	32.98	24.81	33.89	35.09	20.16	12.40
29.58	31.38	23.55	33.70	34.91	11.51	7.26
0.863	1.019	1.054	1.006	1.005	1.752	1.707
33.35	21.33	37.61	22.53	24.80	18.52	28.17
31.50	18.93	36.15	21.53	23.53	11.60	25.58
1.059	1.127	1.040	1.046	1.054	1.597	1.101
24.81	37.68	19.03	36.83	24.60	14.20	
23.50	36.11	12.74	35.63	22.92	9.26	
1.057	1.043	1.494	1.034	1.073	1.533	
33.65	22.53	37.02	22.54	15.53	30.23	
33.49	21.43	35.73	19.63	10.74	28.91	
1.005	1.051	1.036	1.148	1.446	1.046	
34.56	24.71	24.58	15.69	31.43		
35.01	23.58	22.93	10.74	31.30		
0.987	1.048	1.072	1.461	1.004		
19.71	18.20	14.20	30.32			
11.50	11.62	9.21	28.80			
1.714	1.566	1.542	1.053			
12.10	31.33					
7.25	30.02					
1.669	1.044					

Win-Scope  
고리 1호기  
비교치

(d) EOC (임계보론)

그림 3. 시뮬레이터와 고리 1호기 7주기 연소도 비교