

울진 3,4호기 핵연료취급계통의 효율성 분석

장병일 신태명 김인용
한국원자력연구소

요 약

핵연료취급계통 설계를 평가할 수 있는 주요 기준 중 효율성 관점에서 울진 3,4호기의 핵연료취급계통을 분석하여 노심을 재장전하는데 소요되는 시간을 줄일 수 있는 방법을 기기설계와 그 운영측면에서 제시하였다. 핵연료재장전기와 사용후연료취급기는 이송기기의 핵연료삽입구에서 인양기의 속도개선이 요구되고, 이송기기는 핵연료재장전기 및 사용후연료취급기와의 연동장치 변경, 이송속도 및 직립기 회전속도의 개선이 요구되는 것으로 파악되었다.

1. 서 론

우리나라에서 가동중이거나 건설중인 상용 경수로형 발전소의 핵연료취급계통은 Westing House 사 설계, Framatome사 설계, ABB-CE사 설계의 세가지 설계 형태로 분류할 수 있으며, 그 중 ABB-CE사의 설계는 우리나라 울진 3,4호기 핵연료취급계통설계의 기술적 자립의 토대가 되어 왔으나 아직 그 설계측면에서 타사와 비교하여 평가된 바가 없었다. 핵연료취급계통 설계를 평가할 수 있는 주요 기준은 핵연료에 손상이 가지않고 안전하게 핵연료가 취급될 수 있는 안전성, 재장전으로 인한 경제적인 손실을 최소화 할 수 있는 효율성, 방사선으로 부터 운전원 피폭량의 최소화, 그리고 운전원의 실수를 최소화할 수 있는 기능 등이 될 수 있다.

본 논문에서는 핵연료취급계통의 이러한 주요 기준 중 효율성 관점에서 원자로 분해 이후의 핵연료이송에 소요되는 시간을 핵연료취급기기 별로 울진 3,4호기에 대해 분석하여, 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기 핵연료취급기기의 설계속도와 비교 및 평가함으로써, 핵연료취급계통에 대한 향후 개선사항을 도출하였다.

2. 핵연료취급계통의 효율성 분석

2.1 효율성 분석범위

핵연료취급계통의 설계개념은 원자로형, 핵연료집합체 설계, 노심 관리정책 등을 고려하여 노심재장전 과정을 수립하고 각 과정에 요구되는 기기를 재장전이 빠르고 안전하게 수행될 수 있도록 건물 내에 기기와 구역을 적절하게 배치하는 것이다. 따라서 핵연료취급계통의 효율성은 건물 내 기기의 배치, 건물내 수조배치, 기기의 속도 등에 따른 설계관점과 각 나라의 노심 관리정책에 따른 운영관점에서 다를 수 있다. 본 논문에서는 이러한 설계의 효율성을 우리나라 노심 관리정책[1]에 따라 울진 3,4호기를 운영할 경우에 대해 현재 발전소에서 운영되고 있는 방안인 노심과 사용후연료저장대 간에 핵연료를 하나씩 이송하는 경우와 노심과 사용후연료저장대 간에 핵연료를 두 개씩 이송하는 경우로 분류하여 원자로를 재장전하는데 소요되는 시간을 분석하고 기기

의 속도를 검토하였다.

2.2 재장전 소요시간의 분석 방법

노심을 재장전하기 위한 핵연료취급과정은, 신연료를 인수하여 검사한 후 신연료저장대나 사용후연료저장대에 임시 저장하는 과정으로 분류되는 신연료 인수 및 저장과정과, 노심의 핵연료를 사용후연료저장대로 이송하여 검사한 후 사용후연료저장대(혹은 캐니스터)에 저장하거나 노심에 재장전하는 노심연료 취급과정으로 대별될 수 있다. 이 두 과정 중 재장전에 소요되는 시간에 주된 영향을 미치는 과정은 핵연료취급기기가 상호 연계되는 노심연료취급과정이다. 노심연료취급 과정은 노심의 핵연료를 사용후연료 저장대로 이송하는 과정, 사용후연료 저장대의 핵연료를 노심으로 이송하는 과정, 신연료 승강기(New Fuel Elevator, 이하 NFE)의 핵연료를 노심으로 이송하는 과정의 세 과정으로 구분될 수 있다. 이 세 과정을 기기운영의 관점에서 노심에서 핵연료 이송기기 간의 핵연료재장전기(Refueling Machine, 이하 RM) 작동과정, 격납건물과 핵연료건물 간의 핵연료이송기기(Fuel Transfer System, 이하 FTS) 작동과정, 사용후연료저장대(혹은 NFE)와 FTS 간의 사용후연료취급기(Spent Fuel Handling Machine, 이하 SFHM) 작동과정으로 세분하여 각 과정에 대한 기기 작동시간을 다음과 같은 가정과 방법으로 계산함으로써 노심연료취급과정에 소요되는 시간을 예측하였다.

2.2.1 RM의 작동시간 계산

RM의 작동시간 계산에 적용된 가정은 다음과 같다[4][5][7].

- 1) 원자로 중심에서 FTS의 핵연료삽입구까지의 거리는 전 노심의 핵연료를 FTS까지 이송할 때 소요되는 평균거리이다.
- 2) 브리지와 트롤리의 이송궤적은 고속(9.1 mpm)으로 이동될 수 있는 궤적 I 및 II(그림 1)와 같다.
- 3) 인양기 작동구역은 노심에서는 상한정지(up limit) - 하한정지(down limit)와 하한정지 - 케이블처짐(cable slack)으로 구분되고, 고속(5.5 mpm) 과 저속(1.5 mpm)으로 작동되며 FTS의 핵연료삽입구에서는 상한정지 - 걸쇄정지(up latch) 와 걸쇄정지 - 케이블처짐으로 구분된다.
- 4) 인양기 작동시간에 확장기, 집게 및 카메라의 작동시간이 포함되고, 그 시간은 각각 20초, 20초, 6초이다.

RM의 이송주기(RM_c)는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$RM_c = \sum(\text{트롤리 및 브리지 작동시간} + \text{인양기 작동시간}) + \text{대기시간}$$

여기서, 트롤리 및 브리지 작동시간 = 트롤리 이동거리(궤적 I) / 트롤리 속도(고속) +
브리지 이동거리(궤적 II)/브리지 속도(고속)

인양기 작동시간 = [인양기작동거리(상한정지 - 하한정지)/작동속도(고속) +
인양기 작동거리(하한정지 - 케이블처짐)/작동속도(저속) + 확장기 작동시간
+ 집게 작동시간 + 카메라작동시간](노심, 부하) + [인양기작동거리(상한정지
- 케이블처짐)/작동속도(고속) + 확장기 작동시간 + 집게 작동시간 + 카메라
작동시간](노심, 무부하) + [인양기 작동거리(상한정지 - 케이블처짐)/작동속

도(저속) + 집게 작동시간 + 카메라 작동시간](FTS, 부하) + [인양기 작동거리(상한정지 - 케이블처짐)/작동속도(고속) + 집게 작동시간 + 카메라 작동시간](FTS, 무부하)

2.2.2 FTS의 작동시간 계산

FTS의 이송주기(TSc)는 다음과 같이 계산할 수 있다[4][5].

$$TSc = 2 \times (\text{이송차 이동거리}/\text{작동속도}) + 4 \times \text{직립기회전 소요시간} + \text{대기시간}$$

여기서, FTS의 직립기가 회전하는데 소요되는 시간은 설계상의 최대 허용시간인 2분으로 가정하였다.

2.2.3 SFHM의 작동시간 계산

SFHM의 작동시간 계산에 적용된 가정은 다음과 같다[4][5][6].

- 1) NFE와 FTS의 핵연료삽입구 간의 이송궤적은 궤적 III, VI 및 VII(그림 2)와 같다.
- 2) 사용후연료저장조의 중심에서 FTS 핵연료삽입구사이의 거리가 전 노심의 핵연료를 이송할 때 소요되는 평균거리이다(궤적 III, IV 및 V, 그림 2).
- 3) 인양기 작동거리는 상한정지와 케이블처짐 간의 거리이다.
- 4) 핵연료를 삽입 및 인출할 때 공구작동시간은 20초이다.
- 5) 핵연료를 삽입 및 인출할 때 인양기는 저속으로(1.5 mpm) 운전된다.

SFHM의 이송주기(SFHM_c)는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$SFHM_c = \sum(\text{브리지 및 트롤리 작동시간} + \text{인양기 작동시간}) + \text{대기시간}$$

여기서, 브리지 및 트롤리 작동시간 = 트롤리 이동거리(궤적 III+IV, III+VI) / 트롤리 속도(고속) + 브리지 이동거리(궤적 V, VII)/브리지 속도(고속)

인양기 작동시간 = [인양기 작동거리(상한정지 - 케이블처짐)/작동속도(저속) + 공구 작동시간](부하) + [인양기 작동거리(상한정지 - 케이블처짐)/작동속도(고속)](무부하)

3. 분석결과 검토

3.1 재장전과정의 기기 작동시간 및 핵연료 이송주기 분석

3.1.1 노심과 사용후연료저장대 간에 핵연료를 하나씩 이송하는 경우

노심의 핵연료를 사용후연료저장대로 이송하는 과정에서 핵연료 이송주기는 25.04분으로 검토되었다(표 1). FTS의 이송주기는 FTS작동시간 11분과 대기시간 14.04분(RM 작동시간 8.88분, SFHM 작동시간 5.16분)으로 구성되어 있다. RM이 노심에서 핵연료를 인출하여 FTS의 직립기가 수직으로 회전될 때까지 대기하는 시간은 8.16분으로 예측되고, 이 시간을 줄이기 위해서는 FTS의 속도 개선, FTS 핵연료삽입구에서 SFHM의 인양기 속도개선 등이 요구된다. 노심에서 RM에 의한 작업시간은 FTS의 주기에 영향을 미치지 않으므로, 핵연료 취급에 보다 신중을 기할 수 있다. SFHM이 FTS의 핵연료를 집기위해 대기하는 시간은 13.78분으로, 이 대기시간을 최소화하기 위해서는 FTS의 속도개선, FTS 핵연료삽입구에서 RM의 인양기 속도개선 등이 검토되어야 한다. 직립

기가 수평인 상태에서도 RM과 SFHM의 인양기가 상한위치(Up Limit)에 있을 때는 브리지와 트롤리의 이동을 허용하도록 연동장치 설계를 변경함으로써 이송주기를 4.42분 감소할 수 있다. 노심의 핵연료를 전부 핵연료 저장대로 이송하는데 소요되는 시간은 73시간 52분으로 검토되었고, 핵연료를 검사하는데 소요되는 시간을 제외한 재장전 시간은 최소 147시간 44분 이상 소요될 것으로 예상된다. 사용후연료 저장대에서 노심으로 재사용연료나 신연료를 노심으로 이송하는 과정은 노심의 핵연료를 사용후연료 저장대로 이송하는 과정의 역순이며, 기기의 주기와 대기시간은 동일하다. NFE에서 노심으로 신연료를 이송하는 과정에서는 SFHM의 대기시간이 8.65분으로 감소되는데, 그것은 이송거리 증가에 의한 이송소요시간의 증가에 기인한 것이며, 이를 제외하고는 사용후연료 저장대에서 노심으로 이송하는 경우와 동일하다.

3.1.2 노심과 사용후연료저장대 간에 핵연료를 두개씩 이송하는 경우

이송주기가 41.92분, SFHM의 대기시간이 19.40분으로 늘어나는 것으로 파악되어서, 노심과 사용후연료저장대 간에는 핵연료를 하나씩 이송하는 것이 보다 효율적이었다(표 2).

3.2 핵연료 취급기기의 속도 비교

노심재장전 과정에 소요되는 주요 기기인 RM, FTS, SFHM의 속도를 타 사의 기기 속도와 비교하였다[2][3][4](표 3). RM의 브리지 최대속도는 노심에서 FTS까지의 거리가 상대적으로 긴 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기가 울진 3,4호기보다 빠르게 설계되어 있다. 트롤리의 최대속도는 울진 3,4호기가, 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기보다 1.5배 정도 빠르게 설정되어 있으나, 핵연료 이송 소요시간에 크게 영향을 미치지 못할 것이므로 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기의 설계도 타당성이 있다. FTS도 울진 3,4호기가 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기보다 1.5배 정도 빠르게 설정되어 있는데, FTS에 의한 이송소요시간이 재장전시간에 직접적인 영향을 주기 때문에 앞으로 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기의 이송속도 개선을 위한 기기검토가 필요할 것으로 판단된다. FTS의 직립기 회전속도는 고리 1,2호기가 가장 빠르고 울진 3,4호기는 그 1/4정도로 가장 늦는데, 이것은 그 설계를 검토하여 회전속도를 향상시킬 필요가 있다. SFHM의 최대 이송속도는 울진 1,2호기가 울진 3,4호기와 고리 1,2호기의 속도 설정에 비해 절반 정도로 매우 저속이며, 인양속도도 저속에서 울진 3,4호기 및 고리 1,2호기에 비해 매우 저속이므로 사용후연료 취급공구, SFHM의 설계, 발전소 운전원의 작업체험 등을 고려하여 향후 개선이 요구된다.

4. 결론

울진 3,4호기의 핵연료취급계통의 효율성을 분석함으로써 다음과 같은 향후 개선하여야 할 사항을 도출하였다.

- 1) RM과 SFHM은 FTS의 핵연료삽입구에서 인양기 속도를 향상하기 위한 설계개선이 요구된다.
- 2) 직립기가 수평인 상태에서 RM과 SFHM의 인양기가 상한위치(Up Limit)에 있을 때 RM과 SFHM의 브리지와 트롤리가 FTS로 이동될 수 있도록 연동장치 설계변경에 대한 검토가 요구된다.
- 3) FTS는 직립기 회전속도와 이송속도를 핵연료에 기계적 손상을 미치지 않는 범위내에서 최대한 향상시켜야 한다.

참고문헌

1. 원자력법시행규칙 제24조, 발전용원자로 및 관계시설의 운영에 관한 기록 및 비치사항, 1983
2. 고리 1/2호기 최종안전성 분석보고서, 한국전력공사
3. 원자력 9,10호기 설계 및 공사방법 신고서, 핵연료물질 취급 및 저장시설(II), 한국전력공사, 1985
4. N0291-ME-DS-911-00, Design Specification for Fuel Handling System for Ulchin 3&4, KAERI, 1993
5. E-N0291-911-001, Fuel Handling System General Arrangement, KAERI, 1993
6. E-N0291-911-007, Spent Fuel Handling Machine Operating Zone, KAERI, 1993
7. E-N0291-911-017, Refueling Machine Operating Zone, KAERI, 1993

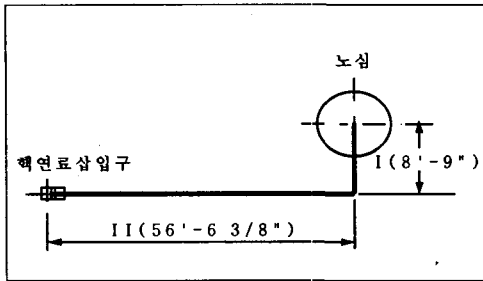


그림 1. RM 이송궤적

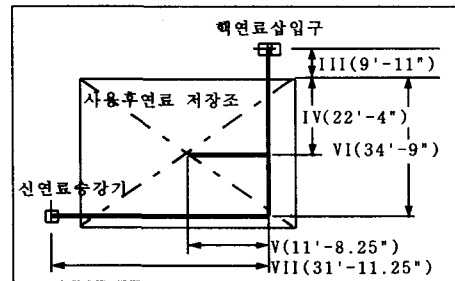


그림 2. SFHM 이송궤적

표 1. 노심의 핵연료를 하나씩 사용후연료저장대로 이송할 경우

(단위 : 분)

RM	소요시간	FTS	소요시간	SFHM	소요시간
궤적 I 이동	0.30	직립기 수평	2.06	대기시간	5.50
인양기 하강	2.55	이송차 이동	1.50		
핵연료 인출	4.85	직립기 수직	2.00		
궤적 I 이동	0.30				
대기시간	8.16	대기시간	5.16	궤적 III 이동	0.33
		직립기 수평	2.00	인양기 하강	0.91
		이송차 이동	1.50	핵연료 인출	3.59
		직립기 수직	2.00	궤적 III 이동	0.33
궤적 II 이동	1.88	대기시간	8.88	궤적 IV, V 이동	0.80
핵연료 삽입	3.76			핵연료 장전	3.59
인양기 상승	1.36			인양기 상승	0.91
궤적 II 이동	1.88			궤적 IV, V 이동	0.80
기기 작동시간	16.88		11.00	대기시간	8.28
이송주기			25.04		

표 2. 노심의 핵연료를 두개씩 사용후연료저장대로 이송할 경우

(단위 : 분)

RM	소요시간	FTS	소요시간	SFHM	소요시간		
궤적 I 이동	0.30	직립기 수평	2.06	대기시간	5.50		
인양기 하강	2.55	이송차 이동	1.50				
핵연료 인출	4.85	직립기 수직	2.00				
궤적 I 이동	0.30	대기시간	5.16	궤적 III 이동	0.33		
대기시간	8.16			직립기 수평	2.00	인양기 하강	0.91
				이송차 이동	1.50	핵연료 인출	3.59
		직립기 수직	2.00	궤적 III 이동	0.33		
궤적 II 이동	1.88	대기시간	25.76	궤적 IV,V 이동	0.80		
핵연료 삽입	3.76			궤적 IV,V 이동	0.80		
인양기 상승	1.36			궤적 III 이동	0.33		
궤적 II 이동	1.88			인양기 하강	0.91		
궤적 I 이동	0.30			핵연료 인출	3.59		
인양기 하강	2.55			궤적 III 이동	0.33		
핵연료 인출	4.85			궤적 IV,V 이동	0.80		
궤적 I 이동	0.30			핵연료 장전	3.59		
궤적 II 이동	1.88			인양기 상승	0.91		
핵연료 삽입	3.76			궤적 IV,V 이동	0.80		
인양기 상승	1.36			대기시간	13.90		
궤적 II 이동	1.88						
기기 작동시간	33.76		11.00		11.26		
이송주기			41.92				

표 3. 주요 기기의 속도 비교

(단위 : meter per minute)

	올진 3,4호기	고리 1,2호기	올진 1,2호기
RM	브리지 : 고속(0-9.1) 저속(0-0.5)	브리지 : 0-12.2 트롤리 : 0-6.1	브리지 : 0.4-11.5 트롤리 : 0.2-5.5
	트롤리 : 고속(0-9.1) 저속(0-0.5)	인양기 : 고속(6.1) 저속(2.1)	인양기 : 0.6- 5.5
	인양기 : 고속(0-5.5) 저속(0-1.5)		
FTS	이송차 : 9.1 직립기 회전속도 : 2분	이송속도 : 5.6 직립기 회전속도 : 20-23초	이송속도: 6.0 직립기 회전속도 : 6.0
	브리지 : 고속(0-9.1) 저속(0-0.5)	브리지 : 0-10 인양기 : 고속(6.1) 저속(2.1)	브리지 : 고속(4.8) 저속(1.2) 트롤리 : 2.4 인양기 : 고속(5) 저속(0.6)
SFHM	트롤리 : 고속(0-9.1) 저속(0-0.5)		
	인양기 : 고속(0-5.5) 저속(1.5)		