

원자력발전소 냉각수 정화계통의 핵종누적량 예측기법

이재민, 황주호
경희대학교

요 약

원자력발전소 냉각수 정화장치내의 운전중 핵종누적량을 계산하기 위하여 계산 프로그램을 작성하여 그 적용성을 평가하였다. 발전소내 측정자료를 재구성한 모의자료를 통한 검증 및 실험을 통해 프로그램의 핵종누적량 계산을 검증하였다. 모의 발전소 측정자료를 통한 예측기법의 적용성 평가에서는 제염계수 측정시 마다 제염계수의 변화폭이 클수록 본방법의 정확성이 상대적으로 향상되었다. 실험을 통한 검증에서는 일련의 정화장치를 통과하여 저장조에 수집된 모의냉각수내 핵종농도를 분석하여 정화장치내에 누적된 핵종량을 계산, 그 결과를 본방법에서의 계산값과 비교를 하였다. 본방법의 계산값의 오차가 상대적으로 작았으며 앞서 수행한 부식생성물의 운전상황에 따른 제염효율 변화예측에 있어서도 본방법이 제염효율 변화를 추적할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

원전 운영시 수반되는 방사성폐기물의 처분 안전성을 확보하기 위하여 폐기물 내의 방사성 핵종 및 방사능량을 알아야만 하며 현재 우리나라를 포함한 각국은 이에 대한 규정을 만들어 준수하도록 하고 있다^{[1],[2],[3],[4]}. 이를 위해서 폐기물 고화체 내의 핵종별 방사능량을 정확하게 계산할 수 있는 방법이 연구되어왔다^{[5],[6],[7]}. 본 연구에서는 포트란 프로그램을 이용하여 발전소에서 측정하는 냉각수내 방사성핵종농도와 주기적으로 측정하는 정화장치별 제염계수 그리고 계산하고자하는 계통의 최종정화장치를 통과한 냉각수내의 핵종농도를 입력자료로하여 그날그날의 순간제염계수를 생성, 정화장치별 핵종누적량을 계산한다. 부식생성물의 운전상황 변화에 따른 제염효율 변화를 고려하였으며 본 프로그램의 적용범위를 부식생성물뿐만 아니라 냉각수내 주요 핵분열 생성물에도 적용하기 위하여 Co-60 과 함께 Cs-137에 대한 계통내 누적량도 계산하였다. 발전소 측정자료를 변화시켜 얻은 모의자료를 통한 적용성 평가에서 본 방법은 최종정화장치를 통과한 핵종방출량을 통한 비교에 있어서 제염계수의 변화폭이 클수록 그 적용성이 좋아짐을 알 수 있다. 또한 모의 시험장치를 통하여 얻은 실험결과와의 비교에서도 역시 본방법이 더 정확한 결과를 나타내었다.

2. 원자로냉각수 정화장치내 핵종누적량 계산

2.1 프로그램 계산식

정화장치별 핵종누적량은 다음 식 (1)~(6) 을 이용하여 계산할 수 있다.

$$A_{CONC.} = (INCONC. - A_{OUT}) \times FLOW \quad \text{---(1)}$$

$$B_{CONC.} = (A_{OUT} - B_{OUT}) \times FLOW \quad \text{---(2)}$$

$$C_{CONC.} = (B_{OUT} - C_{OUT}) \times FLOW \quad \text{---(3)}$$

$$A_{OUT} = \frac{INCONC.}{DF_A} \quad \text{---(4)}$$

$$B_{OUT} = \frac{A_{OUT}}{DF_B} \quad \text{---(5)}$$

$$C_{OUT} = \frac{B_{OUT}}{DF_C} \quad \text{---(6)}$$

위 식에서 A_{OUT} , B_{OUT} , C_{OUT} 는 정화장치 A, B, C 를 통과하여 나온 냉각수내 핵종의 농도이며 $INCONC$ 는 정화장치 A 로 유입되는 냉각수내 핵종농도이다. 그리고 DF_A , DF_B , DF_C 는 정화장치 A, B, C 의 제염계수이며 A_{CONC} , B_{CONC} , C_{CONC} 는 정화장치 A, B, C 에 누적된 핵종누적량이다. 마지막으로 $FLOW$ 는 각 정화장치로 유입되는 냉각수의 유량이다.

2.2 부식생성물 특성에 따른 계산방법

지금까지의 부식생성물에 대한 연구자료^{[8],[9]}를 통하여 부식생성물의 경우 운전상황에 따라 입자의 분율이 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 부식생성물의 입자분율 변화는 1차냉각수 정화장치의 제염효율에 상당한 영향을 주게되는데 이를 초기가동시와 운전정지시를 비교하여 살펴 보면 표 1과 같다. 본 방법에서는 계산과정에서 이러한 제염효율의 변화를 고려하여 각 운전상황에 따라 후단부핵종농도와 오차 보정시 제염효율 변화에 따라 제염계수를 감소 또는 증가 시키며 반복계산을 통하여 허용오차를 만족시키도록 하였다. 또한 이러한 운전상황의 변화가 1차냉각수를 처리하는 첫 번째 필터와 이온교환수지에 상당히 영향을 미치는 점을 고려하여 배열순으로 가중치를 두어 계산하였다. 미국 Rancho Seco 발전소의 측정자료를^[10] 통하여 제염계수를 계산한 결과 본방법은 이러한 경향을 일치되게 반영하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 그림 1-4에 나타내었다.

운전상황	부식생성물 입자분율	필터의 제염효율	이온교환수지의 제염효율
초기가동시	증가	증가	감소
운전정지시	감소	감소	증가

표 1. 운전상황 변화에 따른 제염효율 변화

2.3 모의 측정자료를 통한 프로그램 적용성 평가

본 방법의 검증에는 Rancho Seco 발전소의 1차냉각수의 정화장치인 Letdown filter, Purification demineralizer, Makeup filter 에서 일정주기로 측정된 제염계수를 이용하였다. 일정주기로 측정된 제염계수를 구간별로 1차직선으로 보정하고 보정된 값에 난수를 발생하여 0에서 $\pm 100\%$ 의 오차값을 주어 매일매일의 제염계수를 생성하였다. 실제 발전소의 1차 냉각수 내의 핵종농도와 각 정화장치의 제염계수 측정치 등을 이용하여 300일간의 냉각수 내 핵종농도와 각 정화장치의 제염계수 등을 임의로 생성하여 매일매일의 이러한 자료를 통하여 얻어진 정화장치별 핵종누적량과 본방법의 계산방법으로

계산된 핵종누적량을 비교하여 보았다. 핵종누적량계산에 있어서는 부식생성물인 Co-60의 누적량만을 계산하여 결과를 표2에 나타내었다. 또한 계산방법에 따른 오차를 그림 5에 나타내었다.

ΔDF(%)	취출수여과기			혼상탈염기			보충수여과기 (×e-2)		
	±30	±50	±100	±30	±50	±100	±30	±50	±100
실제값	0.2418	0.2049	0.1982	0.1077	0.1433	0.1488	0.1178	0.1637	0.1666
best DF	0.2988	0.2732	0.2732	0.0522	0.0769	0.0769	0.0571	0.0953	0.0953
avg DF	0.2804	0.2425	0.2244	0.0706	0.1075	0.1250	0.0608	0.1212	0.1526
본방법	0.1769	0.1767	0.1767	0.1725	0.1723	0.1723	0.2136	0.2093	0.2093

단위 [Ci]

표 2. 정화장치별 핵종누적량 계산

2.4 실험장치구성

실험장치는 국내 웨스팅하우스형 원자로(고리 1,2 호기 및 영광 1,2 호기)의 화학 및 체적 조절 계통(CVCS) 계통을 모사하여 제작하였다. 실험장치에 장착된 정화장치는 혼상탈염기 #1, 혼상탈염기 #2, 양이온탈염기, 필터이며 모의 냉각수는 증류수에 Co-60 과 Cs-137 을 섞어서 사용하였다. 실험장치의 개략적인 구성은 다음 그림 6과 같다. 혼상탈염기에 사용된 이온교환수지는 IRN-150 이며 양이온탈염기에는 IRN-77 이온교환수지를 사용하였다. 필터는 스테인레스스틸 (25μm)을 사용하였다. 각 정화장치의 제염계수 측정을 위하여 정화장치 전·후단부에서 시료를 채취하여 핵종농도를 측정하였으며 저장조의 시료를 채취하여 저장조내의 방사성핵종의 양을 계산하였다. 혼상탈염기의 경우 #1 과 #2 를 교대로 운전하였으며 이 때마다 수지를 교체하였다. 수지의 양을 초기 5ml 에서 10ml 로 증가시켜 실험하였다. 이는 정화장치에 사용되는 이온교환수지의 성능향상으로 인한 제염효율변화를 고려한 것이며 양이온탈염기의 경우 실험 전기간 동안 수지의 양을 5ml로 하여 실험하였다.

2.5 실험자료를 통한 프로그램 검증

실험을 통하여 혼상탈염기의 제염계수 46개와 필터의 제염계수 45개, 양이온탈염기의 제염계수 9개를 얻었으며 저장조의 시료분석을 통하여 저장조내의 핵종량을 계산하였다. 실험을 통하여 얻은 핵종농도 자료와 제염계수를 통하여 프로그램을 실행하여 정화장치 내의 핵종량을 계산하였다.정화장치내 핵종량은 다음 식(7) 과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{정화장치내 총핵종량} &= \text{실험에 사용한 모의냉각수내 핵종량} \\ &- \text{채취한 시료중에 포함된 핵종량} \\ &- \text{저장조내의 핵종량} \end{aligned} \quad \text{--- (7)}$$

실험을 통한 결과와 프로그램을 통한 정화장치내 핵종누적량 계산의 비교에 있어 실험을 통하여 각각의 정화장치내에 누적된 핵종량을 얻을 수 없어 모든 정화장치 내에 누적된 총핵종량을 통하여 검증하였다. 프로그램의 실행에 있어서 입력자료로서의 각 정화장치별 제염계수를 줄여가며 입력하여 계산을 수행하였다. 실험을 통하여 얻은 계산결과와 프로그램을 통하여 얻은 계산결과를 표 3에 나타내었다. 또한 제염계수 측정값과 계산값을 그림 7-8에 나타내었다.

		Co-60 핵종량	Cs-137 핵종량
모의냉각수내 핵종농도		7.5 - 5.0 e-3 $\mu\text{Ci/ml}$	
사용 모의냉각수내 핵종량		55.35	55.35
채취시료내 핵종량		4.46	7.09
저장조내 핵종량		9.42	20.84
정화장치내 총핵종량		41.47	27.42
프로그램 수행으로 얻은 정화장치내 총핵종량	계산 1	43.59	29.54
	계산 2	43.33	32.48
프로그램 계산 오차	계산 1	5.12 %	7.73 %
	계산 2	6.90 %	18.45 %
평균제염계수	계산	49.13	47.46
	오차	18.47 %	73.05 %

* 계산 1 : 가능한 모든 제염계수를 입력자료로 사용
계산 2 : 제염계수의 수를 계산 1의 2/3으로 줄여 입력
단위[$\mu\text{Ci/ml}$]

표 3. 정화장치내 총핵종량 계산

3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 중·저준위 폐기물의 대부분을 차지하는 공정폐기물인 폐필터 및 폐수지에 대하여 누적방사능량을 순간제염계수를 이용한 방법으로 계산하였다. 발전소를 모사한 핵종농도 자료를 통하여 평균제염계수(avg. DF), best DF 를 통한 계산결과와 비교를 하였다. 실제 발전소 운전에서 제염계수의 변화폭이 큰 것을 고려하여 제염계수 측정주기 사이의 제염계수의 변화를 주어 계산한 결과 그 변화가 클 수록 본방법의 정확성이 상대적으로 향상되었다. 또한 부식생성물의 경우 운전상황 변화에 따른 제염효율 변화의 경향을 본방법에서는 일치되게 계산하는 것으로 나타났으며 모의실험 자료를 통하여 평균제염계수로 계산한 결과와 비교를 하였다. 본 방법을 통한 계산값의 정확도가 더 우수하였다.

4. 향후 연구 계획

부식생성물의 경우 원자력발전소의 운전이력 및 운전상황에 따라 발생량 및 용해도에 따라 입자분율의 변화가 일어나게 된다. 이러한 변화는 정화장치의 제염효율에 영향을 주게 되므로 정화장치별 핵종누적량 예측에 있어 운전상황에 따른 변화를 반영하여야 한다. 현재 기동시와 정지시의 운전상황 반영뿐 아니라 원자력발전소 운영중의 냉각수내 보론농도, pH 변화 및 유량변동의 자료를 분석하여 핵종누적량 예측에 적용함이 필수적이라고 판단된다.

* 본 연구는 신형원자로센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1. '방사성폐기물 인도규정', 과학기술처고시 제 91-10 호, 1991.11.22

2. ' 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정 ', 과학기술처고시 제 85-8 호, 1985.7.23
3. U. S. NRC, ' Licensing Requirements for Land Disposal Of Radioactive Waste ', 10 CFR Parts 61, U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1991
4. U. S. NRC, 10 CFR Parts 20.311, U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1991
5. 김환영 외, ' 고화체 특성규명 연구 ', KAERI/RR-892-1/89, 한국원자력연구소, 1991
6. 조성영, ' 가압경수로형 원자력발전소의 액체방사성 폐기물 처리계통에 대한 연구 ', 서울대학교 석사학위 논문, 1983
7. 이병식, ' 고리 2호기 중·저준위 방사성폐기물 방사능량 평가 ', 서울대학교 석사학위논문, 1989
8. EPRI NP-6368, ' Review of the United Kingdom PWR Primary-Circuit-Chemistry Program ', Electric Power Research Institute, 1987
9. EPRI NP-6640, ' The Nature and Behavior of particulates in PWR Primary Coolant ', Electric Power Research Institute, 1989
10. NUREG/CR-2348, ' In-Plant Source Term Measurements at Rancho Seco Station ', U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1981

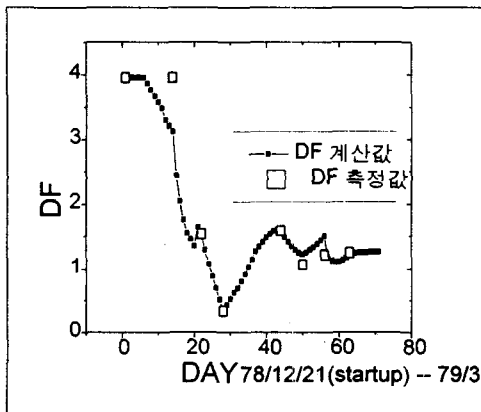


그림 1. 취출수여과기 제염계수(Co-60) 1

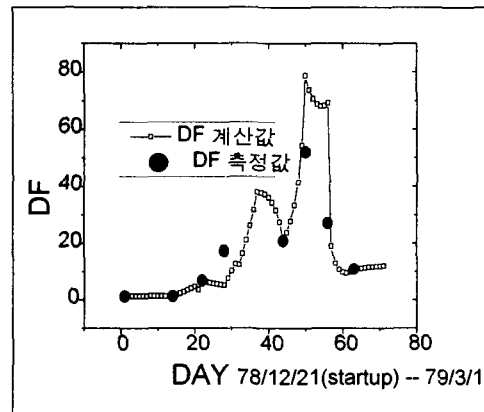


그림 2. 혼상탈염기 제염계수(Co-60) 1

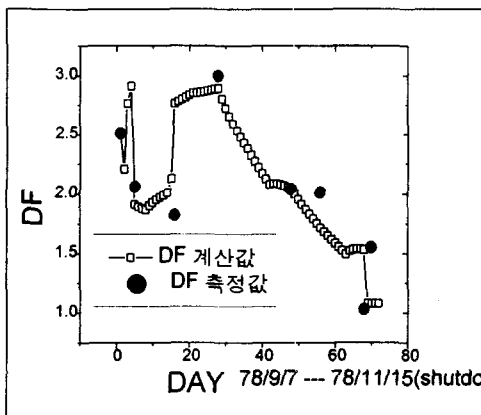


그림 3. 취출수여과기 제염계수(Co-60) 2

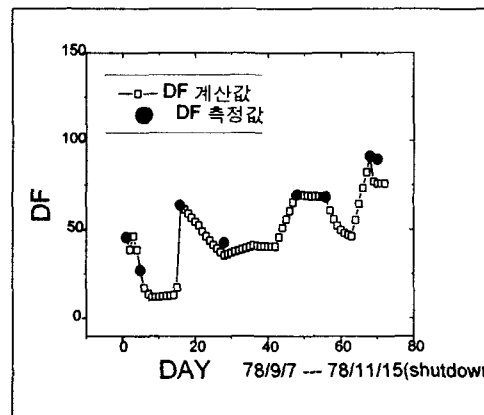


그림 4. 혼상탈염기 제염계수(Co-60) 2

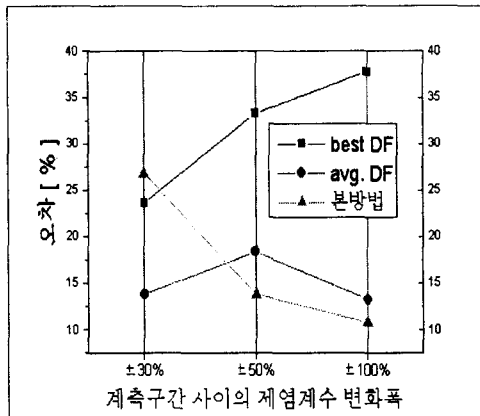


그림 5. 핵종누적량 계산방법에 따른 오차

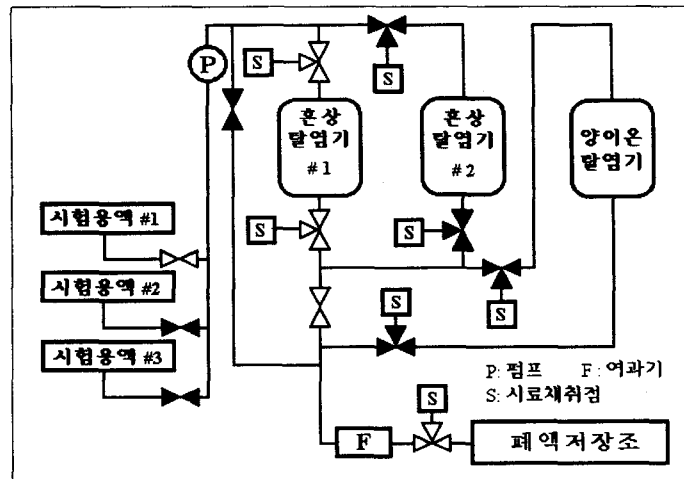


그림 6. 실험장치도

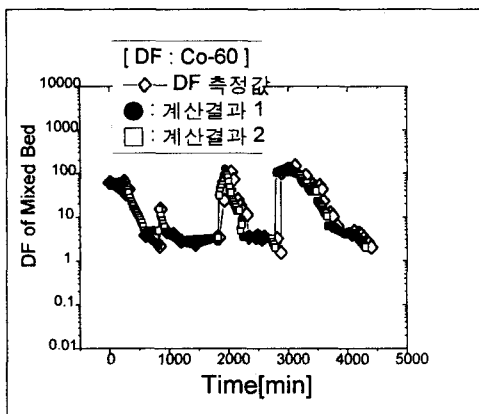


그림 7. 실험장치내 혼상탈염기 제염계수

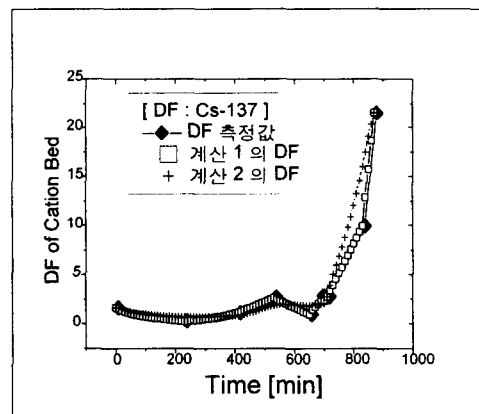


그림 8. 실험장치내 양이온탈염기 제염계수