

우선순위(PI) 기법을 활용한 방사성물질 누설 가능성 평가

양양희, 손순환, 이갑복, 손욱
 한전전력연구원, 대전 유성구 문지로 105
 yhyang@kepri.re.kr

1. 서론

원전 사업자는 운영 중에 발생하는 방사성물질이 외부환경으로 유출되지 않도록 많은 노력을 기울여야 한다. 2005년 전후에 미국의 일부 원전에서 방사성 액체가 비계획적으로 유출되어 부지 내 지하수가 오염된 사례가 있다. 이에 따라 미국의 EPRI에서는 비계획적 유출물 발생을 방지하기 위해 계통, 구조물 및 기기(SSC, System, Structure, Component)에 대해 누설위험도 순위를 정하여 관리하는 우선순위(Priority Index, PI) 평가기법을 개발하였다. 이 PI 평가기법은 현재 미국에서 SSC의 누설위험도의 평가의 표준방법으로 널리 쓰이고 있다. 본 논문은 SSC에 대한 PI 평가기법을 살펴보고, 국내원전에 적용하여 평가한 결과에 대해 논하였다.

2. 본론

2.1 PI 평가기법

PI 값은 지하수 오염을 야기할 가능성과 야기된 오염의 중대성의 곱으로 산정한다. 즉 누설위험도를 다음과 같이 누설 가능성(Likelihood)과 누설 시 중대성(Consequence)의 두 요소로 평가한다.

$$PI = \text{Likelihood} \times \text{Consequence} \times N \dots (1)$$

여기서 N은 PI 값을 백분율로 표현하기 위한 상수로 100/9의 값을 갖는다.

누설 가능성과 누설 시 중대성은 다시 세부 항목으로 구성된다. 누설 가능성은 해당 SSC에서 누설이 일어날 가능성을 누설이력(H_L), 상태(C_L) 및 설계(D_L) 측면에서 세분화한다. 누설 시 중대성은 해당 SSC의 재고량(I_C), 핵종의 위해도(H_C) 및 이동성(M_C) 그리고 누설 후 검출 가능 여부(P_C)에 따라 평가한다. 각 요소에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Likelihood} = \frac{[H_L + C_L + D_L]}{3} \dots (2)$$

$$\text{Consequence} = \frac{[I_C + H_C + M_C + P_C]}{4} \dots (3)$$

최종적으로 평가된 PI 값은 그 값이 클수록 지하수 오염위험도가 크다는 것을 의미한다. 그러나 PI 값의 계산에 필요한 평가항목 중 일부는 평가 수행자 및 해당 발전소 상황에 의존하기 때문에, 특정 발전소에서 계산된 PI 값을 다른 발전소의 PI 값과 비교하는 것은 무리가 있다고 할 수 있다.

평가대상이 되는 SSC는, 방사성 액체가 저장되어 있거나 또는 통과 가능성이 있으면서, 동시에 방사성 액체가 토양 및 지하수로 누설될 가능성이 있는 계통, 구조물 및 기기이다. EPRI는 평가대상을 System의 경우 Pipe Sleeves between Buildings 외 49개, 구조물은 Spent Fuel Pool 외 15개, 그리고 기기는 Primary Water Tank 외 24개를 선정하고 평가하도록 제시하였다. 하지만 PI 기법을 처음으로 적용하는 발전소는 EPRI에서 제시한 모든 SSC에 대해 평가를 할 경우 많은 인력 및 예산이 수반되어야 하는 등 어려움이 따를 수 있다. 평가 대상 SSC의 개수는 발전소 상황에 따라 적절히 조정할 필요가 있다고 할 수 있다. 실제 미국 St. Lucie 원전의 경우, 모든 SSC에 대한 평가를 하지 않았으며 Condensate Polishing 외 19개 SSC에 대해서 PI 평가를 수행하였다.

2.2 평가결과

평가대상 SSC 선정을 위해, EPRI에서 제시한 평가 후보군을 참조하여 고리 1,2호기는 Spent Fuel Pool 등 31개의 평가 대상 SSC를 선정하였다. 월성 1, 2호기는 중수로로서 EPRI 평가대상 후보군을 적용하는데 어려움이 있었다. 이에 고리 1, 2호기에서 선정한 SSC에서 경수로 고유분을 제외한 후, 중수로 특성을 반영하여 Spent Fuel Bay 등 37개를 선정하였다. 아래 Table 1에 고리 1,2호기의 평가대상 리스트를 나타내었다.

Table 1. 평가대상 List

<ul style="list-style-type: none"> • Building Sump Piping • Building Sumps and Moats (that interface with the ground) • Spent Fuel Pool • Spent Fuel Transfer Canal • Spent Fuel Pool Cask Wash Area • Spent Fuel Pool Cooling and Cleanup Equipment • Residual Heat Removal Piping • Component Cooling water system • Component Cooling Water Lines running between Buildings or Underground • Component Cooling Seawater Sys • Refueling Water Storage Tank • Refueling Water Storage Tank (RWST) Moat Drain Pipe • Primary Water Tank • Aux Steam Condensate Return Sys • Steam Generator Blowdown Piping • Turbine Hall Drains 	<ul style="list-style-type: none"> • Main Steam Sys • Condensate Sys • Condenser Cooling Water Sys • Condenser Leak Detection Sys • Radioactive Waste Treatment Sys • Active Drainage Sys • Radwaste Pipelines, especially Discharge Line • Drain Lines for Laundry System • Floor & Roof Drains in potentially contaminated areas interfacing with the ground • Building Walls with potential interior leaks (e.g. Spent Fuel Pool, Transfer Canal) • Seismic Gaps (Seams) between Buildings • Storm Drain Collection Basin and Yard Drainage System • Sample Lines that run between buildings or underground, including secondary side systems • Laboratory Drain Tank Lines • CV Dewatering Sump
--	--

평가자는 현장 전문가로서 고리 1발 3명, 월성 1발 4명을 선임하여 평가하였다. 평가결과는 평가자에 따라 상이하였다. 고리 1,2호기의 경우 최대 PI 값을 평가자 A는 CV Dewatering Sump를, 평가자 B는 Spent Fuel Pool를, 평가자 C는 Turbine Hall Drains를 선정하였다. PI값의 합리적인 값을 얻고자 3명 평가자의 평가결과를 평균해 보았다. 그 결과, 최대 PI 값으로 1호기에서는 Spent Fuel Pool, 2호기에서는 Refueling Water Storage Tank, Turbine Hall Drains 그리고 CV Dewatering Sump로 나타났다. 월성 1,2호기의 평가결과는 평가자의 최대 PI 값이 일부는 같으나 대부분 각각 다르게 나타났다. 최대 PI 값을 평가자 A는 Active Drainage System을, 평가자 B는 Component Cooling Water System 및 D₂O Sampling System을, 평가자 C는 Spent Fuel Bay를, 평가자 D는 Spent Resin Storage Vault를 각각 선정하였다. 평가자 4명의 최대 PI값을 평균해 본 결과, 최대값으로 모두 Spent Fuel Bay를 평가하였다. 아래 Table 2는 고리 1호기에 대해 평가자 A의 평가결과를 보여주고 있다.

Table 2. 평가결과

ITEM	Likeliness			Consequence					Priority Index	
	History	Condition	Design	Inventory	Hazard	Mobility	Post Release Detection	Score		
Building Sump Piping	0	1	0	0.3	1	1	1	1	1.0	3
Building Sumps and Moats	0	3	0	1.0	1	1	1	2	1.3	8
Spent Fuel Pool (or bay)	1	1	1	1.0	2	2	1	1	1.5	8
Spent Fuel Transfer Canal	0	1	0	0.3	2	2	1	1	1.5	3
Spent Fuel Pool	0	1	0	0.3	2	2	1	1	1.5	3
SFR Cooling Equipment	0	1	0	0.3	1	2	1	1	1.3	3
RHR Piping	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
CCW System	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
CCW Lines	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
CC Seawater Sys	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
RWST	0	1	1	0.7	2	2	1	0	1.3	3
RWST Drain Pipe	0	1	1	0.7	2	2	1	0	1.3	3
Primary Water Tank	0	1	1	0.7	2	2	1	0	1.3	3
Aux Steam Return	0	1	0	0.3	1	1	1	2	1.3	3
SFR Blowdown Piping	0	1	1	0.7	1	2	1	2	1.5	3
Turbine Hall Drains	0	1	1	0.7	1	1	1	2	1.3	8
Main Steam Sys	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
Condensate Sys	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
CCWS	0	1	0	0.3	1	1	1	0	0.8	3
Cond. Leak Detection Sys	1	2	0	1.0	1	1	1	1	1.0	4
Radwaste Treatment Sys	0	1	0	0.3	1	2	1	1	1.3	3
Active Drainage Sys	0	1	0	0.3	1	1	1	1	1.0	3

한편, 발전소별 PI값 경향을 파악하기 위해, PI 값 전체를 평균한 결과 고리 1, 2호기는 7을, 월

성 1, 2호기는 16으로 월성이 고리의 2배로 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 세부 항목 값들을 분석한 결과 동일한 경향을 띄는데, 이는 삼중수소가 지하수의 오염원이며 중수로라는 노형의 특성이 반영된 것이라고 판단된다. 아래 Table 3은 세부항목 평균값을 보여주고 있다.

Table 3. 세부항목 평균값

구분	History	Condition	Design	Inventory	Hazard	Mobility	Post Release Detection
고리 (A)	0.03	1.12	0.72	1.41	1.26	1.15	0.82
월성 (B)	0.59	1.12	1.13	1.83	1.53	1.93	0.87
B/A	18.4	1.0	1.6	1.3	1.2	1.7	1.1

3. 결론

EPRI에서 개발한 PI 평가기법을 이용하여 국내 원전의 계통, 구조물 및 기기에 대해 누설위험도 순위를 평가해 보았다. 그 결과 Spent Fuel Pool이 대부분 누설위험순위가 높은 것으로 나타났다. 노형별로 요소 값을 비교했을 때 중수로가 경수로에 비해 높았다. 이는 중수로가 삼중수소의 발생률이 높은 노형 특성이 반영된 것이라고 본다. PI의 평가값은 평가자별로 다르게 나타났는데 이는 평가기준 및 방법에 대한 평가자들의 이해가 상이했다고 본다. 따라서 평가자 선정방법 및 평가방법에 대한 일부사항을 보완하여 시행한다면 원전부지 지하수 오염방지에 기여할 것으로 본다.

4. 참고문헌

- [1] Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants, 1016099, EPRI, 2008.
- [2] 원전부지 지하수 오염 해외사례 조사 보고서, 한전전력연구원, 2010.
- [3] 원전부지 지하수 모니터링 방안연구, 최종보고서, 한전전력연구원, 2011.