'97 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

1/4 다중안전계통의 계통 및 기기 불이용도 평가

오 규명, 성 계용
한국원자력안전기술원

요약

본 연구에서는 울진 3, 4호기 보조급수계통의 1/4 다중안전계통에 대해 기기불이용도식을 유도하여 점검주기 변화에 따른 기기 불이용도를 평가하였고 계통단계에서는 IRRAS Code를 사용하여 계통 불이용도를 평가하였다. 그리고 선형 열화 모델을 이용하여 잦은 점검으로 인한 역효과가 계통 및 기기 불이용도에 미치는 영향을 평가하였다. 상기 역효과를 고려하였을 경우 점검주기 변화에 따른 기기 및 계통의 불이용도는 거의 유사한 경향을 보였고 점검주기가 대략 2개월에서 기기 및 계통 불이용도가 낮게 나타났다.

1. 서론

보조급수계통은 주급수계통이 상실되었을 경우 증기발생기에 보조급수를 공급하는 공학적 안전설비이다. 본 계통은 사고를 완화시키는 안전 기능 역할을 하기 때문에 확률론적안전성평가(PSA) 수행 결과 여러 계통중에서 보조급수계통 고장으로 인해 노심손상을 일으킬 수 있는 확률이 상당히 높은 것으로 평가되고 있어 본 계통이 운전 불능일 경우 원전의 위험도는 증가할 수밖에 없다. 특히 보조급수계통 펌프는 다른 계통의 펌프에 비해 1개월 주기로 시험하여 그 운전성을 유지하고자 하나 오히려 빈번한 점검과 보수로 인하여 인간 실적등을 유발하여 펌프의 안전 운전 측면에서 위해 요소가 되고 있는 것으로 나타났고 실제 이로 인해 발전소 안전성을 저해되는 경우가 상당수 보고되고 있다. 현재 이와 같은 빈번한 점검으로 인한 안전성 저해 요소를 보완하기 위해 확률론적 위험도 평가 방법을 이용하고 또한 운전 경험에 근거하여 점검시험주기(Surveillance Test Interval : STI)/허용정지시간(Allowed Outage Time : AOT)을 최적화하고 있다. 최근 여러 보고서에서는 보조급수펌프에 대해 빈번한 점검 및 보수로 인한 기기의 마모에 의한 역효과를 고려하여 점검주기를 3개월로 연장하는 방향을 권고하고 있다.[1] 위와 같은 최적화 방향은 확률론적위험도평가 기법을 이용하여 노심손상빈도 측면에서 이루어지는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 기기 및 계통 불이용도 관점에서 점검주기

를 평가하고자 하였다. 이와 관련하여 적용계통으로는 1/4 다중안전계통인 울진 3, 4호기 보조급수계통을 채택하여 점검주기에 따른 기기 및 계통의 불이용도를 평가하였다. 기기단계에서는 트레인별 교번점검 및 기기별 균일 교번점검에 대한 기기불이용도을 계산하였고 계통단계에서는 본 계통에 대한 고장 수목을 작성하고 여기에 펌프에 대한 기기고장 모델을 적용하여 점검주기 변화에 따른 계통 불이용도를 평가하였다. 또한 선형 열화 모델을 적용하여 본 계통의 펌프 점검으로 인한 역효과가 계통 및 기기의 불이용도에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

2. 본론

2-1. 계통 및 기술지침서 설명

표준형 원전인 울진 3, 4호기 보조급수계통의 단순 계통도는 그림1과 같다. 보조급수계통은 독립된 2개의 트레인으로 구성되고 각 트레인은 각 1개씩의 전동기 구동 펌프와 증기터빈 구동펌프, 2개의 보조급수 격리 전동기 구동 밸브 및 각 안전 관련 질소 보충계통을 지닌 2개의 보조급수 공기 구동 조절 밸브로 구성된다. 보조급수는 복수저장탱크로부터 공급되고 탈염수탱크 혹은 순수 계통으로부터 대체 급수를 사용할 수 있다. 본 계통의 1대 펌프 운전 불능시 7일 이내에 운전 가능 상태로 복구하여야 하고 그렇치 못할 경우 적어도 다음 6시간내에 고온대기상태로 가고 다음 18시간내에 고온정지상태를 유지하여야 한다. 또한 2대의 펌프 운전 불능시 3일 이내에 운전 가능 상태로 복구시켜야 하고 그렇치 못할 경우 원자로를 상기 상태로 전환하여야 한다. 그리고 펌프의 운전 가능성을 확인하기 위해 울진 3, 4호기 보조급수펌프의 경우 3개월 점검주기로 교번 점검에 의해 펌프 운전성 시험을 하도록 기술지침서에 제시되어 있다.

2-2. 기기 불이용도 평가

1/4 다중안전계통의 기기점검시 트레인별 교번점검 및 기기별 균일 교번점검을 고려하여 기기 불이용도식을 유도하였다.[2, 3] 기기고장에 의한 공통원인 고장은 펌프 기동 방식과 동력원이 서로 다르기 때문에 펌프 종류에 따라 상호 독립적으로 가정하여 β 모델을 적용하였다. 교번 점검으로 인한 인적오류 고장은 상호 독립적인 것으로 가정하였다.

2-3. 계통 불이용도 평가

계통 불이용도를 평가하기 위해 울진 3, 4호기 최종확률론적 안전성평가 보고서[4]중 주급수 상실과 이에 따른 원자로 정지 사건에 대한 보조 급수 계통의 신뢰도 분석을 수행하였다. 본 계통의 성공 기준은 4개의 보조급수 펌프중 적어도 1대를 사용하여 2대의 증기발생기 중 한 대의 증기 발생기에 급수를 공급하는 것으로 가정하였다. 계통불이용도 평가를 위해 본

연구에서는 다양한 기능이 추가된 미국 INEL에서 개발한 IRRAS 코드를 사용하였다. 보조급수계통 신뢰도 분석에 사용된 데이터는 표 1에서 제시된 것과 같이 ALWR PRA Key Assumptions and Groundrules(KAG)(Rev. 5)가 이용되었다. 열화 관련 인자를 계산하기 위해 보조급수펌프의 열화인자는 표 2에서 제시된 것처럼 NUREG 보고서에 제시된 자료를 사용하였다.[5, 6]

허용정지시간과 점검주기 대상으로서 점검주기 변경과 관련하여 보조급수계통 모든 계열의 모터구동 펌프 및 증기구동펌프을 고려하였다. 허용정지시간 및 점검주기의 변화를 적용한 기기 이용불능도에 대하여는 다음과 같은 기기고장모델을 적용하였다[7].

$$Q_{avg} = \frac{\tau_r}{T} + q_{d,ccf} + q_{r,ccf} + q_d + \frac{1}{2}\lambda T + Q_m$$

위 식에서 왼쪽항은 평균 기기 불이용도를 나타내고 오른쪽 항은 차례대로 기기의 점검과 보수, 동작 요구시 공통원인고장, 동작시 공통 원인 고장, 동작 요구시 고장, 동작시 기기 고장 및 인적 오류등으로 인한 기기 불이용도에 대한 기여도를 나타낸다. 여기서 T는 점검주기, λ는 동작시 기기 고장율이고 시험기간 τ_r은 보수적으로 허용정지시간으로 가정하였다. 실제 기기의 공통원인 고장이 STI/AOT 변화에 따라 변하나 여기서는 STI/AOT 변화가 기기의 점검 및 보수와 동작시 기기의 고장으로 인한 효과만을 고려하여 상수로 가정하였다.

2-4. 점검에 의한 역효과를 고려할 경우 기기 및 계통 불이용도 평가

원전에서 디젤발전기 혹은 보조급수펌프와 같은 안전 계통은 일반적으로 1개월 주기 시험으로 인한 노후화 영향의 누적 때문에 기기가 점진적으로 마모된다. 이로 인해 기기의 불이용도는 증가되고 또한 관련 안전계통의 불이용도는 증가하게 된다. 점검에 의한 기기 열화는 Demand stress(Cycle-related stress)와 Standby stress로 구분되고 요구시 및 작동시 고장율에 대해 점검으로 인한 역효과를 고려한 선형열화모델은 다음과 같다.[8]

가. 점검에 의한 역효과를 고려하지 않는 경우

$\rho(n) = \rho$

$\lambda(n,t) = \lambda$

나. 점검에 의한 역효과를 고려한 경우

$$\rho(n) = \rho + \rho P_1 n \quad \left(P_1 = P_{1m}\frac{n_1}{n_1+n_2} = \frac{a\,T_{TS}^2}{2\rho}\frac{n_1}{n_1+n_2} \right)$$

$$\lambda(n,t) = \lambda + \lambda P_2 n \qquad \left(P_2 = P_{2m}\frac{n_1}{n_1+n_2} = \frac{aT_{TS}}{\lambda}\frac{n_2}{n_1+n_2} \right)$$

여기서 n ; 시험 횟수, t ; 점검주기 기간동안의 시간, ρ ; 요구시 고장율 , λ ; 작동시 고장율, T_{TS} ; 기술지침서에 제시된 점검 주기, a ; 열화가속율(Aging acceleration rate) , n_1 : n_2 ; 작동시 고장횟수에 대한 요구시 고장횟수의 비, P_1 : 요구시 점검으로 인한 Degradation Factor, P_2 : 작동시 점검으로 인한 Degradation Factor로 정의된다.

3. 분석 결과

1/4 다중안전계통에 대한 기기고장모델을 적용하여 기기 및 계통 불이용도를 각각 평가해 보았다. 또한 여기에 선형 열화 모델을 적용하여 점검으로 인한 역효과를 고려하였을 경우 각각의 불이용도 및 점검주기에 미치는 영향을 정량적으로 평가해 보았다. 그림 2에서는 역효과가 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 기기불이용도를 보여주고 있다. 역효과가 고려되지 않은 경우 점검주기에 따라 기기불이용도는 증가하였지만 점검에 의한 역효과를 고려하였을 경우 기기불이용도가 1개월에서 최소였고, 2개월의 점검주기에도 기기불이용도 증가는 거의 없었다. 그림 3은 각각 트레인별 교번점검 및 기기별 균일 교번점검에 역효과를 고려하였을 경우 기기불이용도를 보여 주고 있다. 기기별 균일 교번점검에 비해 트레인별 교번점검은 점검주기가 증가하였을 경우 기기불이용도가 크게 증가하였다. 이로부터 점검주기가 클 경우 트레인별 교번점검보다는 기기별 균일 교번점검이 기기이용도 측면에서 유리함을 알 수가 있었다. 그림 4에서는 계통 불이용도를 나타낸 것인데 역효과를 고려하지 않았을 경우 점검주기가 대략 1개월 정도부터 불이용도가 증가하는 것으로 났다. 그러나 여기에 점검으로 인한 역효과를 적용하였을 경우 점검주기는 대략 2개월이 되어도 불이용도 증가는 거의 없었다. 이처럼 기기 및 계통 불이용도 평가시 점검으로 인한 역효과를 고려하였을 경우 점검주기 변화에 따른 기기 단계 및 계통 단계의 불이용도는 두 가지 경우가 거의 유사한 경향을 보였고 각각 점검주기가 2개월일 경우 불이용도가 다른 점검주기에 비해 비교적 낮음을 알 수가 있었다. 따라서 본 연구에서 적용한 모델 및 분석 결과를 볼때 기술 지침서에 제시된 점검주기에 비해 낮은 2개월을 적용하였을 경우 기기 및 계통 이용도 관점에서 유리하리라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 1/4 다중안전계통인 울진 3, 4호기 보조급수계통 펌프 점검에 선형 열화 모델을 적용하여 점검주기 변화가 계통 및 기기의 불이용도에 미치는 영향을 하였다. 잦은 점검으로 인한 역효과 고려시, 점검주기가 클 경우 트레인별 교번점검보다는 기기별 균일 교번점검이 기기이용도 측면에서 유리함을 알 수가 있었다. 또한 점검주기 변화에 따라 기기 및 계통 불

이용도는 거의 유사한 특성을 보였고 대략 점검주기가 2개월에서 기기 및 계통 불이용도가 최소가 됨을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Lobel R. and Tjader T.R, Improvements to Technical Specification Surveillance Requirement., NUREG-1366, May 1992
2. G. Apostolakis and T.L. Chu, The Unavailability of System Under Periodic Test And Maintenance, Nuclear Technology Vol.50, Mid-Aug. 1980
3. G. E. Apostolakis, P. P. Bansal, Effect of Human Error on the Availability of Periodically Inspected Redundant Systems, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-26, No 3, 1977
4. Ulchin Units 3&4, Final Probabilistic Safety Assessment Report, Rev.0
5. B.M, Meale, Aging and Service Wear of Auxiliary Feedwater Pumps for PWR Nuclear Plants, NUREG/CR-4597 Vol.2, 1988
6. William E.Vesely, Risk Evaluations of Aging Phenomena : The Linear Aging Reliability Model and Its Extensions, NUREG/CR-4769, 1987
7. 제무성 외, 허용정지시간 및 점검주기 평가체제 개발, KINS/HR-156, 1996
8. I. S. Kim, W. E. Vesely et. al, Quantatative Evaluation of Surveillance Test Intervals Including Test-Caused Risks, NUREG/CR-5775, 1992

표 1. 울진 3, 4호기 보조급수펌프 고장 자료

	요구시 고장율	작동시 고장율	인적 오류
터빈구동펌프	1.50e-2(EF=3.6)	3.00e-4/h(3.6)	1.76e-3(2.3)
	1.20e-3(10)(CCF)	9.00e-7/h(10)(CCF)	
모터구동펌프	3.00e-3(9)	1.50e-4/h(16)	1.76e-3(2.3)
	2.39e-4(10)(CCF)	4.50e-7/h(10)(CCF)	

표 2. 보조급수펌프에 대한 열화 관련 인자

인자 / 펌프종류	Aging factor	요구시 고장에 대한 test degradation factor(P_1)	작동시 고장에 대한 test degradation factor(P_2)
터빈구동펌프	0.11	1.992E-02	1.956E-03
모터구동펌프	0.12	4.165E-02	2.310E-03

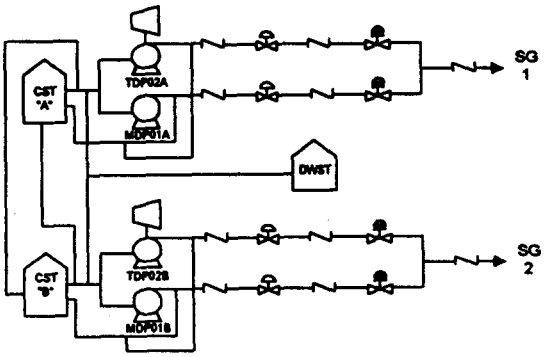

그림 1 Simplified P&ID of auxiliary feedwater system

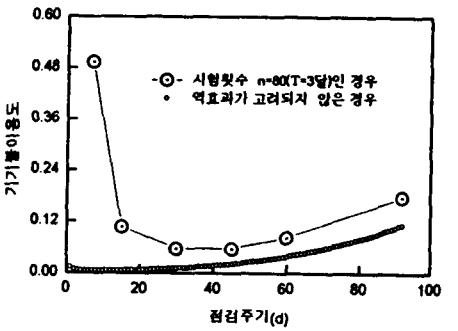

그림 2. 역효과가 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 기기불이용도

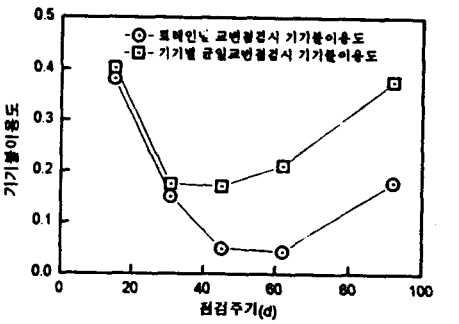

그림 3. 역효과가 고려된 트레인별 교번 점검 및 기기별 균일 교번 점검에 대한 기기불이용도

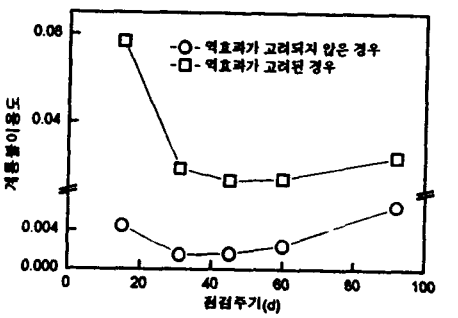

그림 4. 역효과가 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 계통불이용도