

울진 3,4호기의 허용정지시간 변경에 대한 연구

A Feasibility Study on the Change of Allowed Outage Time for Ulchin Units 3&4

강대일, 김길유, 유동한, 진영호
dikang@nanum.kaeri.re.kr, kykim@nanum.kaeri.re.kr,
dhyu@nanum.kaeri.re.kr, yhjin@nanum.kaeri.re.kr

한국원자력연구소

요 약

본 논문에서는 미국의 원자력위원회가 제안한 위험도 정보를 이용한 기술지침서 개정 방법론을 활용하여 울진 3,4호기의 허용정지시간 변경에 대한 위험도를 평가하고, 이를 바탕으로 운전중 예방보수가 가능한 기기들을 선정하였다. 연구 결과로는 첫째, 울진 3,4호기의 주요 안전계통 중 고압안전주입계통과 보조급수계통을 제외한 다른계통들은 현재의 허용정지시간을 증가시켜도 발전소 위험도가 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 둘째로는, 허용정지시간 변경에 따라 초기사건 빈도와 공통원인고장 확률도 변하게 되는데 위험도 평가시 이에 대한 고려 유.무는 위험도 평가 결과에 커다란 영향을 준다는 것이 밝혀졌다. 마지막으로, 운전중 보수가 가능한 기기들은 정지냉각계통과 격납용기 살수계통의 열교환기와 펌프, 비상 디젤 발전기 등으로 나타났다.

Abstract

In this paper, the risk assessment on the change of allowed outage time(AOT) for Ulchin Units 3 & 4 was performed using the risk informed technical specification change methodology which was recommended by the U.S. NRC. The maintainable components during power operation of Ulchin Units 3 & 4 were also identified based on the risk assessment results. The study results showed that the AOT of major safety systems for Ulchin Units 3 & 4 except high pressure safety injection system and auxiliary feedwater system can be increased with negligible risk increase of them. Secondly, the assessment results are greatly different depending on whether the initiating event frequencies and common cause failure probabilities are modified by the change of AOT or not. Finally, the maintainable components during power operation of Ulchin Units 3&4 are identified as the pumps and heat exchangers of shutdown cooling system and containment spray system, the emergency diesel generator, and etc..

1. 서론

원자력발전소에서는 발전소의 안전성에 중요한 기기가 작동불능일 경우 이들 기기는 기술지침서(technical specification)에서 규정한 제한시간내에 수리되어야한다. 허용정지시간(allowed outage time: AOT)이란 이처럼 기기수리를 위해 주어지는 제한된 시간을 말한다. 허용정지시간은 어떤 조치(예:정지)가 요구되기전 안전계통의 기기나 계열(train)이 운전 못하는 상태로 있을 수 있는 시간으로 규정된다. 또 다른 의미로는 기기의 기능상실로 과도한 위험도를 유발시키지 않으면서 고장난 기기를 수리할 수 있는 시간으로 정의 될 수 있다. 최근에는 허용정지시간보다 완성시간(completion time)이라는 용어를 사용하고 있다. 허용정지시간이 길면 상대적으로 큰 위험도를 유발할 수 있고, 허용정지시간이 짧으면 부적절한 보수와 또는 불필요한 발전소의 정지를 가져올 수 있다. 허용정지시간 동안에는 일반적으로 기기의 기능이 상실되기 때문에 발전소의 위험도는 증가된다.

지금까지 허용정지시간은 대부분 공학적인 판단에 의해 결정되어왔는데, 원자력발전소의 운전경험과 확률론적 안전성 평가(probabilistic safety assessment: PSA) 수행결과 이러한 허용정지시간은 변경되어야한다는 주장이 제기되어 왔다[1]. 발전소 사업자 입장에서는 발전소의 불필요한 정지를 피하고 운전의 유연성 확보를 위해 허용정지시간 증가가 요구된다. 특히, 최근에는 운전중 보수(on line maintenance)실시로 그 필요성이 점점 증대하고 있다. 또다른 측면에서는 발전소의 허용정지시간과 관련된 위험도를 줄이기 위해 허용정지시간 감소가 요구된다.

현재 국내.외의 많은 원전 사업자들은 PSA 기법을 이용하여 허용정지시간을 포함한 기술지침서를 개정했거나 개정중에 있다. 미국의 원자력규제위원회에서는 1997년도에, 위험도 정보를 이용한(risk-informed) 기술지침서 개정에 관한 규제 지침 초안을 발표하였고[2], 국내 규제기관인 안전기술원에서도 PSA 기법을 규제업무에 활용하기 위한 연구를 수행중에 있다. 본 연구의 목적은 울진 3,4호기의 허용정지시간 변경에 대한 타당성 분석과, 전출력 운전중(on-line)에 예방보수(preventive maintenance)할 수 있는 계통들을 선정하는 것이다. 이를 위해 위험도정보를 이용한 기술지침서 개정에 대한 미국의 규제지침[2]과 동 규제지침에서 언급한 방법론[1, 2]을 울진 3,4호기 1단계 PSA 모델[3]에 적용하였다.

2. 허용정지시간 관련 위험도 평가 방법

PSA에서는 대기중인 안전계통의 기기가 불시정지할 경우, 이에 대한 기기 이용불능도를 다음과 같이 모델링한다;

$$q = f * d \dots\dots\dots(식1)$$

여기서, q는 불시 보수로 인한 기기의 이용불능도이고, f는 기기 정지시간(downtime) 빈도 즉 불시정지 보수 빈도이다. d는 허용정지시간과 관련된 기기의 실제 정지시간으로서 기기의 수리시간이다. 기기수리시간은 정기적으로 이루어지는 기기의 보수시간과는 다르다.

기기가 작동하지 못함으로써 생기는 허용정지시간 관련 위험도의 평가는 기기의 정지로 생기는 증가된 조건부 노심손상확률(incremental conditional core damage probability: ICCDP)을

계산함으로써 이루어진다. 또다른 용어로는 단일사건 허용정지시간 위험도(single-event allowed outage time risk)를 사용하고 있다[1]. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다;

$$r = \Delta R * d = (R_1 - R_0) * d \dots \dots \dots (\text{식2})$$

r: 증가된 조건부 노심손상확률

ΔR : 기기 정지시의 조건부 위험도 수준 증가

R_1 : 기기가 정지한 경우 증가된 위험도 수준

R_0 : 기기가 정지하지 않은 경우 감소된 위험도 수준

d: 허용정지시간과 관련된 정지시간, 보통은 기기수리시간으로 표현됨

규제지침 초안에서 제시된 증가된 조건부 노심손상확률 기준치는 5.0E-7이기 때문에 이 값을 (식2)에 대입하면 이론적인 최대 평균 허용정지시간은 다음과 같다;

$$d = 5.0E-7 \times 24(\text{시간/일}) \times 365(\text{일/년}) / \Delta R$$

$$= 4.38E-3(\text{시간/년}) / (R_1 - R_0) \dots \dots \dots (\text{식3})$$

(식3)에서 알 수 있듯이 허용정지시간의 증가나 감소는 ΔR 과 밀접히 관련이 있다. 허용정지시간 증가가 가능한 계통의 실질적인 허용정지시간은 위의 (식3)에서 얻어진 허용정지시간보다 작다. 허용정지시간 증가가 가능한 계통이 많이 있을 경우에는 모든 계통의 허용정지시간 증가로 인한 위험도가 (식3)을 만족해야하기 때문에 계통의 허용정지시간 모두를 증가시킬 수 없다.

3. 울진 3,4호기 적용

허용정지시간 관련 위험도를 평가하기 위해 앞에서 언급한 방법론을 울진 3,4호기 1단계 내부사건 PSA 모델에 적용하였다. 울진 3,4호기 PSA 모델에서는 PSA 수행시 울진 3,4호기가 설계중인 관계로 기기의 불시정지로 인한 이용불능도를 울진 3,4호기 기술지침서의 허용정지시간과 Oconee PSA에서 사용한 데이터를 이용해 평가하였다 [3].

3.1 위험도 평가

먼저, 현재의 울진 3,4호기에 규정돼 있는 허용정지시간이 보수적이라는 전제를 하고 각 계통의 허용정지시간을 늘려서 평가하였다. 안전주입탱크는 1시간에서 24시간으로, 이차측 냉수계통들은 단일기기에 대해 14일로, 나머지 계통들은 3일에서 7일로 허용정지시간을 변경해 평가하였다. 허용정지시간이 증가할 경우, 그에 따라 수리시간 또한 증가한다고 가정하였다. 허용정지시간 변경시 이에 영향받는 초기사건빈도와, 공통원인고장도 고려하여 평가하였다. 위험도 평가시 사용한 전산코드는 KIRAP이며 사고경위 절삭 제한치(truncation limit)는 1.0E-11이다. 현재 규제기준치인 증가된 조건부 노심손상확률이 5.0E-7[2]를 넘은 것으로 나타난

계통은 고압안전주입계통과 보조급수계통으로 나타났다. 이들 2계통을 제외하고는 표 1의 계통 각각의 허용정지시간은 확장가능한 것으로 나타났다. 한편 증가된 조건부 노심손상확률이 $1.0E-7$ 이상이고 $5.0E-7$ 이하로 평가된 계통은 저압안전주입계통, 격납용기살수계통, 정지냉각계통, 비상 디젤발전기로 나타났다. 허용정지시간 변경에 따른 위험도 평가결과 운전중 정비를 수행할 수 있는 기기로는 저압안전주입계통 펌프, 격납용기살수계통 열교환기와 펌프, 정지냉각계통 열교환기, 기기냉각수계통 펌프와 열교환기, 필수냉방기계통 펌프와 냉각기(chiller), 필수해수계통 펌프, 비상 디젤발전기로 나타났다.

본 분석에 나타난 허용정지시간 변경이 가능한 계통 모두의 허용정지시간을 변경하고 운전중에 보수를 할 수 있는 계통 모두를 보수하는 것은 발전소의 위험도를 크게 증가시키기 때문에 실질적으로는 불가능하다. 발전소 운전의 안전성 확보와 경제성을 고려하여 위에서 언급한 대상계통에 대한 허용정지시간 증가와 운전중의 보수를 할수 있는 계통을 선정해야 할 것이다. 또 현재의 분석은 1단계 내부사건 PSA 결과만을 이용한 것이기 때문에 최종적인 결과는 외부사건이나 정지/저출력 PSA를 이용한 위험도 평가와 전출력 운전 중 기기의 예방 보수에 대한 위험도 평가를 수행해야 알 수 있다[1, 2].

3.2 민감도분석

허용정지시간이 변경되면 그에 따라 공통원인고장 확률과 초기사건 빈도가 변하는데 위험도 평가시 이에 대한 고려 유.무의 효과를 파악하기 위해 민감도분석을 수행하였다. 허용정지시간 변경으로 인한 공통원인고장 영향이나 초기사건 영향을 고려했을 경우와 안 고려 했을 경우의 위험도 평가결과는 커다란 차이를 나타내고 있다. 비상디젤 발전기 경우, 공통원인고장 영향을 고려한 기본안의 증가된 조건부 노심손상확률은 고려 안한 결과 보다 약 30배 높게 나타났다. 기기냉각수계통, 필수해수계통, 필수냉방계통 모두의 허용정지시간을 변경한 경우, 기본안의 증가된 노심손상 확률은 초기사건을 고려 안한 결과에 대해서는 약 76배 높게 나타났고, 공통원인고장과 초기사건 모두를 고려 안한 결과에 대해서는 약 83배 높게 나타났다.

변경된 허용정지시간을 기기 수리시간으로 했을 경우의 위험도 평가결과 저압안전주입계통, 보조급수계통, 격납용기살수계통, 비상 디젤발전기의 허용정지시간 변경에 대한 증가된 조건부 노심손상확률이 규제기준치인 $5.0E-7$ 을 초과한 것으로 나타났다. 참고문헌 [1]에서는 최대 허용정지시간을 사용하여 분석을 해야 한다고 했지만 이 최대 허용정지시간을 사용한 평가결과가 규제지침 기준을 넘었을 경우, 취해야할 조치에 대해서는 별도의 언급이 없다. 규제 입장에서는 이 분석 결과를 수리시간을 전혀 알 수 없거나, 사용자가 지나치게 낮은 수리시간을 사용하여 허용정지시간 변경을 요청할 경우, 또는 너무 증가된 허용정지시간 변경을 요구할 경우, 참고적인 정보로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

고압안전 주입계통과 보조급수 계통의 현 허용정지시간은 낙관적으로 설정돼 있는것으로 판단돼 앞의 (식3)을 이용하여 위험도 기준치를 넘지않는 허용정지시간을 구했다. 평가결과, 기술지침서상의 보조급수계통 1계열 이용불능에 대한 허용정지시간은 2시간으로, 보조급수계통1계열당 1대의 펌프들이 이용불능시 이에 대한 적정 허용정지시간은 48시간으로

나타났다. 고압안전주입계통의 한 펌프가 이용불능일 경우의 적정 허용정지시간은 12시간으로 나타났다. 보조급수계통과 고압안전주입계통의 적정 허용정지시간에 대한 최종적인 판단은 전출력 운전에서 정지운전으로 바뀌는 전이 위험도(transition risk)와 전출력 대 정지 운전에 대한 위험도 평가를 수행해야 알 수 있을 것으로 판단된다[1, 2].

민감도분석 항목으로는 그 이외에 보수주기 변경, 데이터 불확실성, 수리와 보수 정책 또는, 인간오류 확률, 가동중 보수시 이에 대한 효과 등이 있지만 본 분석에서는 수행하지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 위험도 정보를 이용한 기술지침서 개정에 대한 미국의 원자력규제위원회 규제지침과 동 규제지침에서 언급한 방법론을 올진 3,4호기에 적용하여 기술지침서의 한 부분을 이루는 허용정지시간 변경에 대한 위험도를 평가하였고, 운전중 예방보수를 할 수 있는 기기들을 선정하였다. 올진 3,4호기 1단계 내부사건의 PSA를 이용한 분석결과, 고압안전주입계통과 보조급수계통을 제외한 다른계통들은 현재의 허용정지시간을 증가시켜도 발전소 위험도가 크게 증가하지 않은 것으로 나타났다. 현재의 올진 3,4호기 기술지침서에 제시된 보조급수계통과 고압안전주입계통의 허용정지시간은 감소시킬 필요성이 있는 것으로 밝혀졌다. 허용정지시간 변경에 따라 초기사건 빈도와 공통원인고장 확률도 변하게 되는데 위험도 평가시 이에 대한 고려 유.무는 위험도 평가 결과에 커다란 영향을 준다는 사실이 밝혀졌다. 운전중에 보수할 수 있는 기기들은 저압안전주입계통 펌프, 격납용기살수계통 열교환기와 펌프, 정지냉각계통 열교환기, 기기냉각수계통 펌프와 열교환기, 필수냉방기계통 펌프와 냉각기(chiller), 필수해수계통, 비상 디젤발전기로 나타났다.

본 연구 결과는 규제지침 초안에서 기술지침서 개정 제안시 사용하는 PSA 범위가 외부사건을 제외한 1단계 내부사건이기 때문에 한계점이 있다. 구체적인 결과를 얻기 위해서는 다음과 같은 연구가 심도깊게 이루어져야 한다;

- 1) 외부사건 PSA를 이용한 평가
- 2) 정지냉각 운전과 관련된 기기는 정지운전 PSA를 이용한 평가
- 3) 격납용기 관련계통은 2단계 PSA를 이용한 평가
- 4) 전출력 운전 중의 기기 예방보수에 대한 평가
- 5) 국내 원자력발전소의 기기 수리시간에 대한 데이터 수집과 이를 이용한 평가

위험도 정보를 이용한 기술지침서 개정 방법론을 원자력발전소의 운영기관이나 규제기관 모두가 조속히 도입할 필요가 있다. 운영기관은 위험도 정보를 이용한 기술지침서 개정 방법론을 발전소 운전이나 기술지침서 개정에 사용함으로써 발전소 운전의 유연성을 확보하며 핵연료 재장전시에만 보수하던 기기들을 운전중에 보수할 수 있는 근거를 마련할 수가 있을 것이다. 규제기관에서는 허용정지시간을 포함한 기술지침서의 여러가지 사항들이 발전소 위험도 측면에서 적정한가 여부를 판단하는데 사용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P. K. Samanta, I.S. Kim, T. Mankamo, and W.E. Vesely., “Handbook of Methods for Risk-Based Analyses of Technical Specification”, NUREG/CR-6141, 1994
2. “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking:Technical Specifications”, draft regulatory guide DG-1065, NRC, 1997
3. “Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3 & 4”, KEPCO, 1997

표 1. 주요 계통에 대한 허용정지시간 변경

계통	조건	현재의 허용정지시간	증가 또는 감소된 허용정지시간
SIT	1개의 안전주입탱크 이용불능시	1시간	24시간
HPSI	한개의 부속계통 이용불능시	72시간	12시간*
LPSI	한개의 부속계통 이용불능시	72시간	7일
CSS	한 계열의 격납건물 계통 이용불능시	72시간	7일
AFWS	1개의 보조급수계통 펌프가 이용불능시	7일	7일**
	1개의 보조급수계통 계열 이용불능시	72시간	2시간*
	각 계열당 1개의 보조급수계통 펌프가 이용불능시	72시간	48시간*
CCWS	1개의 안전성관련 유로가 이용불능시	72시간	72시간**
	1개의 기기냉각수계통 펌프 또는 열교환기 이용불능시	규정 없음	14일
ESWS	1개의 필수 해수계통 유로가 이용불능시	72시간	72시간**
	1개의 필수 해수계통 펌프 이용불능시	규정 없음	14일
ECWS	1개의 필수냉방수 유로가 이용불능시	7일	7일**
	1개의 필수냉방수 냉방기 또는 펌프 이용불능시	규정 없음	14일
SDCS	1개의 정지냉각 부속계통 이용불능시	72시간	7일
DG	1개의 비상 디젤발전기가 이용불능시	72시간	7일

*: 감소, **: 변동없음