2000 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

허용정지시간 변경에 대한 승인 기준치 연구

A Study on the Acceptance Criteria for the Change of Allowed Outage Time

강대일, 김길유
한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 허용정지시간 변경에 대한 국외의 승인 기준치를 검토하여 국내에서 사용할 승인기준치와 PSA 수행범위를 제안하였다. 미국의 규제지침서를 토대로 허용정지시간과 관련된 발전소의 영구적 변경과 일시적 변경에 대한 승인 기준치를 제안하였다. 영구적 변경에 대한 승인기준으로 사용되는 위험도 평가척도는 노심손상빈도 증가치, 증가된 조건부 노심손상확률, 대량초기누출빈도 증가치, 증가된 조건부 대량초기누출확률이며 일시적 변경은 조건부 노심손상빈도, 조건부 노심손상확률, 조건부 대량초기누출확률이다. 영구적 변경에 대한 승인 기준치는 기본분석, 상세분석, 승인불가 기준치로 분류하였으며 일시적 변경에 대한 기준치는 그 기준치 사용의 특성을 반영하여 기본분석과 승인불가 기준치로 분류하였다.

Abstract

In this paper, the acceptance criteria and the PSA scope on the change of allowed outage time which could be used by domestic regulatory body are recommended after the review of foreign acceptance criteria on it. The recommended acceptance criteria, based on US NRC regulatory guide, are applied to the permanent and temporary changes of nuclear power plant related to allowed outage time. The risk measures used as the acceptance criteria for permanent changes are increase of core damage frequency, incremental conditional core damage probability, increase of large early release frequency, and incremental conditional large early probability. The risk measures for temporary changes are conditional core damage frequency, conditional core damage probability, and conditional large early release probability. The acceptance criteria for permanent changes are categorized as basic analysis acceptable value, detailed analysis acceptable value, and unacceptable value. The acceptance criteria for temporary changes are categorized as basic analysis acceptable value and unacceptable value.

1. 서론

일반적으로 위해시설(hazard facilities)에 대해서는 안전성을 확보하는 방안으로서 위험도 척도(risk measure)와 기준치를 설정하고 있다. 원자력 발전소에서 많이 사용하고 있는 정량적인 위험도 척도로서는 원자로 사고로 누출되는 방사선에 의한 초기 사망 위험도

(individual risk of early fatality: IREF), 초기대량누출빈도(large early release frequency: LERF), 노심손상빈도(core damage frequency: CDF) 등이 있다[1]. 원자력 발전소의 사업자가 발전소 안전성에 영향을 주는 기기의 설계 변경이나 기술지침서 등을 변경하기 위해서는 그 변경으로 인한 위험도를 평가하여 그 변화된 위험도가 승인 기준치 이내에 있다는 것을 보여야 한다[2, 3, 4, 5].

기준치에는 크게 발전소의 변경으로 인한 위험도의 상대적 변화를 기준으로 하는 상대적인 기준치와 절대적인 변화를 기준으로 하는 절대적인 기준치가 있다[3]. 기준치를 또 다르게 분류하면 발전소의 영구적 변경과 일시적 변경에 적용하는 기준치가 있다. 안전성 규제에 상대적인 기준치를 사용하면 현 수준의 위험도에 대한 상대적 변화를 판단함으로써 위험도 관리가 용이하고 현존하는 확률론적안전성평가(probabilistic safety assessment: PSA)의 다양성과 발전소의 특이성들을 반영할 수 있다. 그러나 상대적인 값을 동일하게 적용할 경우, 절대적 위험도가 높더라도 상대적으로 변경된 위험도가 작으면 많은 변경을 허용하고, 절대적 위험도가 낮더라도 상대적으로 변경된 위험도가 클 경우 작은 변경을 허용하게 된다. 절대 기준치의 사용은 규제자 기관의 입장에서 일반적인 보건과 산업안전의 기준과 관련시킬 수 있고, 전체 산업계의 안전성 관리에 일관성을 유지할 수 있다. 그러나 엄격하게 적용하면 낮은 위험도의 발전소에는 커다란 변경을 허용하고 높은 위험도의 발전소에는 작은 변경을 허용하게 된다. 영구적 변경은 기술지침서의 허용정지시간(allowed outage time: AOT) 변경 등을 말하고 일시적 변경에는 출력 운전 중에 기기 고장으로 인한 고장정비(corrective maintenance) 수행을 위해 허용정지시간을 일시적으로 변경하는 것을 말한다.

기술지침서 등의 개정시 기준치와 함께 고려해야 하는 또 하나의 요소는 PSA 수행범위이다. 규제 지침서 1.174[4]와 1.177[5]에서는 계통의 변경을 하려면 계통과 관련된 PSA 를 수행해야 한다고 언급하고 있다. 예를 들면 정지냉각계통은 정지냉각운전과 관련이 있기 때문에 동 계통의 허용정지시간이나 시험주기를 변경하면 내부사건뿐만 아니라 정지사건과 외부사건 그리고 2 단계 PSA 에 대한 영향도 평가해야 한다고 언급하고 있다. 만일 정량적 분석을 위한 PSA 모델이 없으면 변경을 제안한 사업자는 정성적인 논의(qualitative arguments)나 경계분석(bounding analysis) 등을 수행해야 한다고 언급하고 있다.

허용정지시간 변경과 관련된 규제 기준치와 수행해야만 하는 PSA 범위는 현재 국내에 설정돼 있지 않다. 이에 본 논문에서는 국외의 허용정지시간 변경과 관련된 승인 기준치와 규제사항을 검토하여 국내 규제기관이 허용정지시간 변경에 대해 설정할 승인 기준치와 PSA 수행범위를 제안하였다. 이를 위해 미국과 불란서의 규제기관과 사업체의 관련 문헌[3, 4, 5, 6]을 검토하였다. 미국은 기준되는 값을 승인 기준치로 하고[3, 4, 5], 불란서는 연속운전과 정지운전에 대한 위험도 평가 결과와 출력 운전중의 기본 노심손상빈도에 대한 연간 확률과의 차이[6]를 기준치로 설정하고 있다.

2 장에서는 미국과 불란서의 허용정지시간 변경에 대한 기준치와 검토에 대해 기술하고, 3 장에서는 제안된 기준치에 대해 기술하였고, 끝으로 4 에서는 결론을 기술하였다.

2. 각국의 기준치와 검토의견

허용정지시간 변경에 대한 미국의 규제기관인 원자력규제위원회(nuclear regulation committee: NRC)[4, 5]와 원전 사업자들의 연구기관인 전력연구소(electrical power research institute: EPRI)의 PSA 응용 지침서[3]의 승인기준치, 그리고 불란서의 허용정지시간 결정 방법[6]에 대한 사항을 개략적으로 소개하고 검토의견을 기술하였다.

2.1 미국 원자력규제위원회의 승인기준치

허용정지시간 변경과 관련된 NRC 의 위험도 평가척도는 노심손상빈도 증가치(increase of core damage frequency: ΔCDF), 증가된 조건부 노심손상확률(incremental conditional core damage probability:ICCDP), 대량초기누출빈도 증가치(increase of large early release frequency: ΔLERF), 증가된 조건부 대량초기누출확률(incremental conditional large early release probability :ICLERP)이다[5]. 허용정지시간을 변경하기 위해서는 기본적으로 이들 위험도를 평가해야 하고 평가된 위험도가 평가척도의 기준치이내에 있어야 한다[4, 5]. 이들 위험도 척도 모두는 기술지침서 변경과 같이 영구적인 변경만을 그 적용 대상으로 하고 있다. 대량초기누출사고(Large Early Release Accident)란 원자로가 깨진후 2 시간이내에 세정되지 않은(unscrubbed) 방사성물질이 격납건물 밖으로 급격하게 유출되는 사고를 말한다[3, 7].

2.1.1 노심손상빈도 증가와 대량초기누출빈도 증가 기준치

노심손상빈도 증가(ΔCDF)와 대량초기누출빈도 증가(ΔLERF)에 대해 언급하고 있는 규제지침서 1.174[4]는 허용정지시간 변경 뿐만 아니라 PSA 를 이용한 의사결정 전 분야에 적용된다. 동 규제 지침서에서는 발전소 변경시 수행해야 하는 PSA 범위를 계통 변경과 관련된 모든 PSA(내부,외부,정지운전, 2 단계)로 규정하고 있다. 변경에 대해 평가되는 위험도는 표 1 의 노심손상빈도와 대량초기누출 빈도 증가에 대한 규정 사항 모두를 만족해야 한다. 즉, 표 1 에서 ΔCDF 에 대한 규정사항 중 하나와 ΔLERF 에 대한 규정사항 중 하나를 만족해야 한다. ΔCDF 의 최대 값은 1.0E-5(/년)이고 ΔLERF 의 최대값은 1.0E-6(/년)이다. 노심손상빈도 증가 또는 대량초기 누출빈도 증가의 정의는 변경 전후의 위험도 차이다.

표 1 ΔCDF 와 ΔLERF 에 대한 규정 사항

ΔCDF 에 대한 규정사항	ΔLERF 에 대한 규정사항
가. CDF 의 감소	가. LERF 의 감소
나. ΔCDF < 1.0E-6(/년)일 경우, 전체 CDF 를 계산할 필요가 없슴, 만일 CDF 가 1.0E-4(/년)보다 상당히 크면 CDF 감소에 초점	나. ΔLERF < 1.0E-7(/년)일 경우, 전체 LERF 를 계산할 필요가 없슴, 만일 LERF 가 1.0E-4(/년)보다 상당히 크면 LERF 감소에 초점
다. 전체 CDF< 1.0E-4(/년) 일 경우, 1.0E-6(/년) < ΔCDF < 1.0E-5(/년)	다. 전체 LERF< 1.0E-4(/년) 일 경우, 1.0E-7(/년) < ΔLERF < 1.0E-6(/년)

2.1.2 증가된 조건부 노심손상확률과 증가된 조건부 대량초기누출확률 기준치

조건부 확률에 대한 기준치는 다음과 같고 평가시 이 기준치 모두를 만족해야 한다[5];

1) ICCDP < 5.0E-7 면 위험도는 작다고 판단,

2) ICLERP < 5.0E-8 면 위험도는 작다고 판단

증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP)이나 대량초기누출확률(ICLERP)은 (식 1)과 같이 계산된다;

(ICCDP 또는 ICLERP) = $\Delta R * d = (R'_1 - R'_B) * d$.....(식 2)

여기서, R'_1 : 허용정지시간 변경시 기기 이용불능으로 인한 위험도,

R'_B : 허용정지시간 변경시 기본 위험도

d: 허용정지시간 변경과 관련된 기기 이용불능시간

증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP) 기준치 5.0E-7 이 나온 근거는 기준 노심손상빈도는 1.0E-4(/년)에서 기기 이용불능 시 증가될 수 있는 최대 노심손상빈도를 10 배로 가정하면 1.0E-3(/년)이된다. 이 경우 기기 평균 수리시간을 5 시간으로 가정하면 조건부 노심손상 확률 기준치는 5.0E-7 이 된다;

2.1.3 검토의견

규제 지침서 1.174[4]에서 노심손상빈도 증가 기준치는 기준 노심손상빈도(CDF)를 1.0E-4(/년)로 보고, 기준 노심손상빈도의 1%이내 증가 즉, 노심손상빈도 증가치(ΔCDF)가 1.0E-6(/년)이내면 PSA 분석 범위 등에 제한을 안 두고, 1%이상 10%미만 증가시에는 제한을, 10%이상의 증가는 허용하지 않는다는 근거로 만들어진 것으로 판단된다. 대량초기누출빈도 증가치(ΔLERF)에 대한 기준치는 노심손상빈도 변화 기준치의 10%를 그 기준치로 하여 만들어졌다. 기준 노심손상빈도 1.0E-4(/년)은 국제적으로 널리 사용되는 정량적인 안전 목표값이고[1] 이 기준치로부터 설정된 위험도 증가 기준치가 10%미만으로 설정되 있기 때문에 국내에서도 규제 지침서 1.174 의 기준치를 수용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 하지만 동 규제지침서에서는 PSA 수행 범위를 명확히 기술하지 않고 있다. 지침서에는 노심손상빈도와 전체 노심손상빈도라는 말이 언급되어 있는데 전체란 말의 의미를 명확히 기술하지 않고 있다. 전체 노심손상빈도란 의미는 기본(내부사건, IPE 등) 노심손상빈도 외에 정지, 외부사건 PSA 모두를 포함하는 노심손상빈도로 해석될 수 있다고 판단된다.

규제 지침서 1.177[5]에서 노심손상확률에 대한 제한치는 한가지 값만 제시하고 있다. 규제 지침서 1.174[4]에서는 노심손상빈도 증가에 대한 승인기준치를 3 가지로 제시했지만, 규제 지침서 1.177 에서는 제시된 조건부 노심손상확률이 제한치 5.0E-7 이상인 경우에 대한 규정이 없다. 규제 지침서 1.177 의 노심손상확률 기준치는 기준 노심손상빈도 1.0E-4(/년)에 토대를 두고 만들었지만 표 1 의 노심손상빈도 증가 기준치와 연관성은 적은 것으로 판단된다. 한편 규제 지침서 1.177 에서는 증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP)과 정비빈도를 고려하여 연간 증가된 조건부 노심손상빈도 계산을 요구하고 있지만 동 규제 지침서에

서 이에 대한 기준치의 언급이 없다.

2.2 미국 EPRI 의 기준치

미국 EPRI 의 PSA 응용 지침서[3]의 기준치는 상대적인 기준치와 절대적인 기준치에 근거를 두고 있다. NRC 의 규제 기준치가 영구적인 변경만을 다루고 있는데 비해 PSA 응용 지침서에서는 일시적인 변경에 대한 기준치도 규정하고 있다. 영구적인 변경과 일시적인 변경 기준치에는 각각 3 가지 범주(category)가 있다. 수행해야 할 PSA 범위에 대해서는 언급하지 않고 있다.

2.2.1 영구적 변경에 대한 기준치

영구적 변경에는 위험도 경미(non-risk significant), 상세평가(further evaluation required), 승인불가(unacceptable) 3 가지 범주가 표 2 에 나타나 있다. 표 2 에서 ΔCDF % 는 노심손상빈도가 변경될 수 있는 상대적인 변화률을 백분율로 나타낸 것이다.

표 2. PSA 응용지침서의 영구적 변경에 대한 승인 기준치

	경미기준	상세기준	승인불가
범위	CDF<1.0E-4(/년)면, ΔCDF % $=10^{[(-0.5*\log(CDFbase))-1]}$ LERF<1.0E-5(/년)면, ΔLERF% $=10^{[(-0.5*\log(LERFbase))-1]}$	경미기준 이상 승인불가 이하 범위	ΔCDF> 1.0E-4(/년) 또는 ΔLERF>1.0E-5(/년)
분석정도	상세분석 불필요	상세분석필요	승인불가

2.2.2 일시적 변경에 대한 기준치

계속 운전에 대한 정당성부여(Justification for Continuing Operation:JCO) 또는 출력 운전중 정비(on-line maintenance) 등에 사용하는 기준치로서 주로 노심손상 확률이나 대량초기 누출 확률 등으로 나타낸다. 어떤 경우이더라도 순간적인 노심손상빈도는 1.0E-3(/년)보다 작아야 한다. 1.0E-3(/년) 보다 큰 경우는 매우 짧은 시간 동안만 허용된다. 위의 영구적 변경과 마찬가지로 3 가지 범주로서 위험도 경미(non-risk significant), 비정량 요소 평가(assess non-quantifiable factors), 위험 변경(potentially risk significant)기준이 표 3 에 나타나 있다.

표 3. PSA 응용지침서의 일시적 변경에 대한 승인 기준치

	경미기준	비정량 요소 평가 기준	위험 변경 기준
범위	CDP< 1.0E-6 이고 LERP <1.0E-7	경미기준 이상 승인불가 기준치 이하	CDP > 1.0E-5 또는 LERP >1.0E-6
분석정도	상세분석 불필요	상세분석필요, 변경함으로써 얻어지는 이득에 대한 논의필요	비용.효과 측면에서 정당화 필요

2.2.3 검토의견

영구적 변경에 대한 PSA 응용 지침서의 기준치는 NRC 의 기준치보다 좀 더 낙관

적이고, 보다 더 상대적이다. 위험도가 경미한 수준의 증가일 경우 NRC 처럼 절대치를 사용하지 않고 기본 노심손상빈도에 따라 노심손상빈도 증가치는 다르다. 노심손상빈도 증가 승인 기준치가 상대적이고 절대적으로 설정되있어 상대적 기준치와 절대적 기준치만의 사용에서 나타나는 단점들을 보완하고 있다. 하지만 원전의 위험도를 종합적이고 체계적으로 관리하고 규제하는 규제기관 입장에서는 기준치의 상대적인 특성으로 일관성 있는 규제 업무 수행에 어려움이 있을 것으로 예상된다. 원전의 안전성에 관한 국민의 관심과 반응은 매우 크고 중요하기 때문에 규제기관에서 위험도에 대한 기준치를 설정할 때 상대성의 도입은 가급적 피하는 것이 바람직스러운 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 국내 기준치 설정에 PSA 응용 지침서의 기준치는 보조적으로만 사용한다

2.3 불란서의 기준치

불란서에서는 절대적 기준치와 상대적 기준치 모두를 사용하고 있는데 상대적인 기준치를 중요시 하고 있다[6].

2.3.1 절대적인 기준치와 상대적인 기준치

절대적인 기준치는 안전계통의 이용불능으로 인한 노심손상확률이 1.0E-7 미만이라는 사실에 그 근거를 두고 다음과 같이 (식 2)으로 표시를 한다;

$$\Delta R.T = 1.0E\text{-}7 \quad \text{…..……(식 2)}$$

여기서, ΔR: 기기 정지로 증가된 위험도, T: 제안된 허용정지시간

상대적인 기준치는 기기 고장시 기기 수리를 연속운전과 정지운전 동안 수행시 발생하는 위험도를 각각 평가함으로써 허용정지시간을 구한다. 그 관계식은 다음과 같다;

전출력에서 연간 노심손상확률의 1%= [연속운전과 관련된 누적 노심손상확률] -
[발전소 정지와 관련된 누적 노심손상확률]

2.3.2 검토의견

불란서의 허용정지시간 기준치는 명백하게 나타나 있는 것이 아니라 허용정지시간 본래 정의의 뜻에 맞게 연속운전과 정지운전중의 기기 수리에 대한 위험도를 비교.평가함으로써 허용정지시간을 구하는 것이다. 이러한 접근법은 허용정지시간 본래의 뜻에 맞게 제대로 설정되어 있는 것으로 판단된다. 그러나, 현재 저출력/정지운전 상황을 정확하게 반영하는 분석모델이 개발되있지 않고, 기존 PSA 방식에 따라 분석을 하더라도 분석시 사용하는 가정사항에 따라 결과에는 많은 차이가 있기 때문에[8, 9] 이 방법을 사용하여 허용정지시간을 결정하는 경우 많은 주의가 요구된다. 따라서 국내에서는 불란서의 기준치 접근법을 채택하지 않는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3. 승인기준치 제안

제안된 승인 기준치는 허용정지시간 관련 발전소의 영구적 변경과 일시적 변경에 적용한다.

3.1 영구적 변경에 대한 승인기준치

영구적 변경에 대한 기준치는 기본적으로 미국의 원자력 규제위원회 기준치를 토대로 만들었다. 영구적 변경에 대한 기준치는 기술지침서의 개정이나 예방정비에 적용한다.

3.1.1 노심손상빈도 증가와 대량초기누출빈도 증가에 대한 승인 기준치

규제지침서의 내용을 토대로 증가할 수 있는 노심손상빈도와 대량초기누출빈도에 대한 해당 기준 노심손상빈도와 대량초기누출빈도, 그리고 PSA 수행범위를 표 4와 5처럼 설정하였다. 표 4와 5에 언급한 내용에 따라 허용정지시간을 변경할 경우, 사업자는 기본 PSA(내부사건 또는 IPE)를 이용하여 허용정지시간 변경에 대한 노심손상빈도와 대량초기누출빈도를 평가한다. 평가된 위험도 차이(ΔCDF 또는 ΔLERF)가 표 4와 표 5의 기본분석 기준치 이내면 평가 대상 계통이 비록 정지운전과 관련이 있더라도 PSA 수행범위는 그 기본 PSA 분석으로 충분하다. 허용정지시간 변경과 관련된 기기 이용불능도가 작고 전체 위험도에 끼치는 영향이 미미하기 때문에[10, 11] 위험도 평가 결과가 기본분석 승인 기준치 이내일 경우 수행해야 하는 PSA 범위를 기본 PSA로 한정시켰다. 표 4에서 노심손상빈도 증가에 대한 기본분석 결과가 만일 기본분석 승인 기준치 1.0E-6(/년)보다 크게 평가되었다면, 정지운전과 외부사건 PSA에 대한 평가를 하여 변경으로 인해 증가된 전체 노심손상빈도 증가치(ΔCDF), 즉 기본, 정지운전, 외부사건 PSA의 노심손상빈도 증가치 모두를 평가한다. 이 경우 전체 노심손상빈도는 1.0E-4(/년)보다 작아야 되고 평가된 노심손상빈도 증가치는 1.0E-5(/년)보다 작아야 한다.

표 4. 승인 가능한 노심손상빈도 증가와 1단계 PSA 수행범위

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: ΔCDF < 1.0E-6	상세분석 승인 기준치: 1.0E-6 < ΔCDF < 1.0E-5	승인 불가 기준치: ΔCDF > 1.0E-5
CDF	기본 CDF가 1.0E-4보다 상당히 크지 않아야	전체 CDF가 1.0E-4보다 작아야	승인불가
PSA 수행범위	기본 PSA(Level 1(internal), 또는 IPE)	기본 PSA 외에 정지운전, 외부사건 PSA	

표 5. 승인 가능한 대량초기누출 빈도 증가와 2단계 PSA 수행범위

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: ΔLERF < 1.0E-7	상세 분석 승인 기준치: 1.0E-7< ΔLERF < 1.0E-6	승인 불가 기준치: ΔLERF > 1.0E-6
LERF	기본 LERF가 1.0E-5보다 상당히 크지 않아야	전체 LERF가 1.0E-5보다 작아야	승인불가
PSA 수행범위	기본 2단계 PSA(Level 1(internal), 또는 IPE)	기본 2단계 PSA 외에 정지운전, 외부사건 PSA	

제안 기준치는 규제 지침서 1.174에서 불명확하게 언급한 PSA 수행범위를 명확한데 그 의의가 있다.

3.1.2 증가된 조건부 노심손상확률과 증가된 조건부 대량초기누출확률

기준치 설정의 일관성 유지를 위하여 조건부 노심손상확률에 대한 기준치를 규제 지침서 1.174[4]의 노심손상빈도 증가(ΔCDF) 제한치를 토대로 정하였다. 규제 지침서 1.174에 따라 기준 노심손상빈도를 1.0E-4(/년)로, 최대 증가 또는 경미하게 증가 가능한 노심손상빈도를 1.0E-5(/년)와 1.0E-6(/년)으로 설정하고 역으로 조건부 노심손상확률에 대한 기준치를 다음 (식 3)과 같이 설정하였다;

조건부 노심손상확률 승인 기준치(ICCDP) = (노심손상빈도 증가 승인 기준치(ΔCDF)) / (정비빈도(/년))……(식 3)

절대적인 기준치로서 고장정비빈도와 예방정비빈도를 각각 연간 1 회라 가정하면, (식 3)에 따라 표 4 의 노심손상빈도의 기본분석 승인 기준치 1.0E-6(/년)에 해당되는 노심손상확률 기준치는 5.0E-7 이 되고, 승인불가 기준치에 해당되는 노심손상확률 기준치는 5.0E-6 이 된다. 표 4 와 표 5 처럼 조건부 노심손상확률과 대량초기누출에 대한 기준치와 수행범위를 표 6 과 7 처럼 정했다. 3.1.1 절과 같이 표 6 의 경우 기본분석한 결과가 기본분석 승인 기준치 5.0E-7 이상으로 나타났다면, 정지운전과 외부사건 PSA 에 대한 영향을 평가한다. 그 평가 결과는 상세분석 승인기준치 이내에 있어야 허용정지시간 등의 변경이 가능하다.

표 6 승인 가능한 증가된 조건부 노심손상확률과 1 단계 PSA 수행범위

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: ICCDP < 5.0E-7	상세분석 승인 기준치: 5.0E-7 < ICCDP < 5.0E-6	승인불가 기준치: ICCDP > 5.0E-6
PSA 수행범위	기본 PSA(Level 1(internal), IPE),	기본 PSA 외에 정지운전, 외부사건 PSA	승인불가

표 7. 승인 가능한 증가된 조건부 대량초기누출확률과 2 단계 PSA 수행범위

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: ICLERP < 5.0E-8	상세분석 승인 기준치: 5.0E-8 < ICLERP < 5.0E-7	승인불가 기준치: ICLERP > 5.0E-7
PSA 수행범위	기본 2 단계 PSA(Level 1(internal), IPE),	기본 2 단계 PSA 외에 정지운전과 외부사건 PSA	승인불가

제안된 기준치의 의의는 규제 지침서 1.177[5]에서 제시한 단일 승인 기준치보다는 합리적으로 차등화된 승인 기준치와 PSA 수행범위를 제시하고 있다.

3.2 일시적 변경에 대한 기준치

일시적 변경에 대한 기준치는 허용정지시간과 관련된 출력 운전 중의 고장정비나 계속 운전의 정당화(JCO), 배열관리(configuration control) 등과 같이 일시적으로 변경되는 순간 순간의 발전소 상태에 대한 위험도 평가 기준치이다. 일시적 변경의 기준치는 그 적용 대상이 일시적이기 때문에 동일한 위험도 척도 사용시 영구적 변경에 대한 기준치에 비해

낙관적일 것으로 판단된다. 기준치 설정에는 두 가지 방안이 있을 수 있다. 하나는 빠른 작업을 요하는 상황이기 때문에 위험도 평가를 쉽게 하기 위해 위험도 평가 척도의 종류를 적게해 노심손상빈도와 노심손상확률만을 평가 척도로 사용하여 기준치를 보수적으로 설정하는 것이고, 다른 하나는 노심손상빈도, 노심손상과 대량초기누출 확률 모두에 대한 위험도 척도를 사용하여 기준치를 낙관적으로 설정하는 것이다.

3.2.1 조건부 노심손상빈도에 대한 승인 기준치

조건부 노심손상빈도에 대한 기준치로서 PSA 응용 지침서[3]와 규제지침서 1.177[5]에서는 기본 노심손상빈도 1.0E-4(/년)의 10 배인 1.0E-3(/년)을 제시하고 있다. 이 값은 기기 이용불능시의 기준치로서 적절히 설정한 것으로 판단되어 국내 기준치로 채택한다.

3.2.2 조건부 위험도확률에 대한 기준치

앞에서 언급한 것과 같이 노심손상확률 한가지만을 위험도 척도로 사용한 경우와 노심손상확률과 대량초기누출확률 모두를 위험도 척도로 사용한 경우 2 가지로 나누어 기준치를 설정하였다.

3.2.2.1 조건부 노심손상확률 만을 사용할 경우

노심손상확률 한가지만을 위험도 평가 척도로 사용하기 때문에 본 연구에서 언급한 표 6 의 영구적 변경 기준치를 채택하여 아래의 표 8 과 같이 설정하는 것이 바람직스러운 것으로 판단된다;

표 8. 일시적 변경에 대한 조건부 노심손상확률 승인 기준치

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: CCDP < 5.0E-7	승인불가 기준치: CCDP > 5.0E-7
PSA 수행범위	기본 PSA(내부사건 또는 IPE)	승인불가

3.2.2.2 조건부 노심손상확률과 조건부 대량초기누출확률 모두를 사용할 경우

PSA 응용 지침서와 본 연구에서 제안한 위험도 확률 기준치를 토대로 기준치는 표 9 와 표 10 과 같이 설정하는 것이 바람직스러운 것으로 판단된다. 기준치 값은 표 6 과 7 의 영구적 변경에 대한 기준치의 두 배 값을 사용하고 짧은 시간에 위험도를 평가하기에 기본 PSA 만을 수행한다.

표 9 일시적 변경에 대한 조건부 노심손상확률의 승인기준치

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: CCDP < 1.0E-6	승인불가 기준치: CCDP > 1.0E-6
PSA 수행범위	기본 PSA(Level 1(internal), IPE),	승인불가

표 10 일시적 변경에 대한 조건부 대량초기누출확률의 승인기준치

기준치 종류	기본분석 승인 기준치: CLERP < 1.0E-7	승인불가 기준치: CLERP > 1.0E-7
PSA 수행범위	기본 2 단계 PSA(Level 1(internal), IPE),	승인불가

일시적 변경에 대한 제안 기준치는 평가 대상 척도의 종류에 따라 그 기준치를 다르게 설정했다는 것에 그 의의가 있다. 일시적 변경에 대해 사용하는 CCDP 와 영구적 변경에서의 ICCDP 는 차이가 있는데 크게 차이 나는 점은 기기 이용불능에 대한 조건부 위험도 평가시 나타난다[10].

발전소의 일시적 변경으로 증가되고 누적되는 위험도에 대한 기준치 즉 배열관리(configuration control)에 대한 기준치가 설정되 있어야 할 것으로 판단된다[5]. 배열관리에 대한 기준치가 설정이 안되면 일시적 기준치의 오용과 남용을 유발할 우려가 있기 때문이다. 이에 대한 연구는 추후 수행할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 허용정지시간 변경에 대한 국외의 승인 기준치와 관련된 문헌을 검토하고 국내에서 사용할 승인기준치와 PSA 수행범위를 제안하였다. 미국의 규제지침서를 토대로 허용정지시간과 관련된 발전소의 영구적 변경과 일시적 변경에 대한 승인 기준치를 제안하였다. 영구적 변경에 대한 승인기준으로 사용되는 위험도 평가척도는 노심손상빈도증가치, 증가된 조건부 노심손상확률, 대량초기누출빈도 증가치, 증가된 조건부 대량초기누출확률이며, 일시적 변경의 위험도 평가척도는 조건부 노심손상빈도, 조건부 노심손상확률, 조건부 대량누출확률이다. 영구적 변경에 대한 승인 기준치는 기본분석, 상세분석, 승인불가 기준치로 분류하였으며 평가된 위험도의 크기가 증가할수록 수행해야만 하는 PSA 범위를 확대시켰다. 일시적 변경에 대한 기준치는 그 기준치 사용의 특성을 반영하여 기본분석과 승인불가 기준치로 나누었다. 본 연구에서 제시한 승인기준치를 실질적으로 적용시에는 다음 사항을 고려해야 한다;

1) 본 연구에서 언급한 기준치는 승인 기준치이지 제한 기준치(limiting criteria)가 아니다.
2) 본 연구에서 언급하지 않는 사항들은 규제 지침서와 PSA 의 일반적인 실무(practice)를 따른다.
3) 국내 표준 원전의 허용정지시간 변경에 대한 대량초기누출빈도와 대량초기누출확률의 평가결과[10]는 본 연구에서 제시한 기본분석 승인 기준치보다 매우 낮게 나타났다. 따라서 표준 원전에 대해서는 2 단계 PSA 에 대한 승인 기준치의 적용이 완화될 수 있을 것으로 판단된다.
4) 표준 원전의 외부사건 PSA 모델을 이용해 위험도를 평가한 결과 내부침수사건은 허용정지시간 변경에 영향을 안 받는 것으로 나타났다[11]. 지진사건 PSA 결과에는 일반적으로 불확실성이 크기 때문에 허용정지시간 변경에 대한 표준 원전의 외부사건 분석은 화재사건만을 분석해도 충분하다고 판단된다.

본 연구에서 제안한 기준치를 안전성이 매우 향상된 개량형 한국 표준 원전(Advanced KNGR)과 같은 발전소에 적용할 경우에는 안전 여유도가 기존 원전보다 크기 때문에 많은 발전소 변경이 허용될 것으로 예상된다. 많은 변경 허용 가능성에 대한 논란이 있지만 원전의 안전성을 총체적으로 감독하고 관리하는 규제 입장에서는 규제 업무의 일관성 유지를 위하여 위험도가 작은 발전소에 많은 변경을 허용하고 위험도가 큰 발전소에 적은 변경을 허용하는 것은 타당한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 기준치에 대해서는 규제기관과 사업자가 함께 의논을 좀 더 해야 할 것으로 판단된다. 추후 본 연구에서 다루지 않는 허용정지시간 변경이나 예방정비에 대한 연간 위험도 증가분(yearly allowed outage time risk contribution)[2, 4]과 배열관리(configuration control)에 대한 승인 기준치 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구 수행시 많은 조언을 해준 안전기술원의 이창주님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김한철 외, "원자력발전소 안전목표 설정을 위한 고찰", '99 추계 원자력학회

[2] P. K. Samanta et al., "Handbook of Methods for Risk-Based Analyses of Technical Specification", NUREG/CR-6141, 1994

[3] "PSA Application Guide", EPRI/TR-105396, EPRI, 1995

[4] "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis ", Regulatory Guide 1.174, NRC, 1998

[5] "An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specifications", Regulatory Guide 1.177, NRC, 1998

[6] "Methods concerning Risk-Based Assessment of Technical Specifications" Sylvain, M.., Derriot, 5th Inter' Conference on Nuclear Engineering, May 26-30, 1997, page 1-4

[7] "Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3 & 4", KEPCO, 1997

[8] 강대일 외, " 전이 위험도를 고려한 허용정지시간 평가 연구", 1999, 춘계원자력학회

[9] 강대일 외, "전이 위험도 평가를 이용한 허용정지시간 결정", 한국원자력연구소, 기술보고서, (발간 예정)

[10] 강대일 외."위험도 정보를 이용한 허용정지시간 변경", 한국원자력연구소, 기술보고서, (발간 예정)

[11] 강대일 외," 외부사건을 고려한 허용정지시간 변경과 출력 운전 중 예방정비에 대한 위험도 평가", 한국원자력연구소, 기술보고서, (발간 예정)