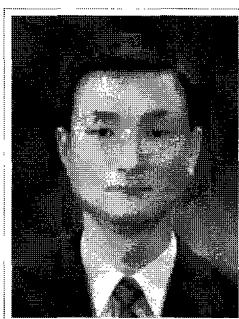




원자력발전소 통합 안전규제 검사 시행

김 선빈

과학기술부 원자력안전과장



머리말

국내에서 가동중인 원자력발전소의 수가 20개 호기로 늘어나는 한 편 설비들의 사용 연수 증가에 따른

노후화 등의 영향으로 원자로 정지 발생 빈도가 지속적으로 증가하고 있으며, 원자로 정지와 같은 운전 과정 상태의 잣은 발생은 원자력발전소의 안전 운영에 부정적 영향을 미친다.

최근 수 년간의 원자로 정지 원인을 분석한 결과에 의하면 터빈 발전기, 주변압기, 송전 계통 등 원자력법령에 의한 안전 규제가 이루어지지 않고 있는 2차 계통¹⁾ 설비들의 고장으로 인하여 원자로가 정지된 경우가 전체 원자로 정지 횟수의 70~80%를 차지하는 것으로 나타나고 있다.

이와 같은 고장이 발생하는 2차

계통 설비의 대부분은 설계·제작 시의 품질 관리가 1차 계통²⁾ 설비와 비교하여 철저하지 못하는 등 본질적으로 고장에 취약한 상태이기 때문에, 이러한 원자로 정지 발생을 포함한 과정 상태 발생을 효과적으로 예방하기 위해서는 취약 설비에 대해 안전 관리를 강화하는 대책의 마련이 필요하다.

2차 계통 설비의 고장 횟수만으로 원전의 안전성을 판단할 수는 없으나, 원전에서의 잣은 고장 발생으로 인해 사회적 측면에서 일반 국민들이 원전에 대해 갖는 신뢰성 및 체감안전성 수준을 저하시키게 하는 한편, 기술적 측면에서도 고장

1) 2차 계통: 증기발생기 2차 계통(전열관 외부)에서 생성된 증기로서 전기를 생산하는 기능을 가진 설비들로서, 터빈/발전기를 포함한 동력 변환 계통, 전력 계통, 기타 지원 계통과 이에 대응하는 계측제어 설비 등을 말한다.
 2) 1차 계통: 원자력을 이용하여 열에너지를 발생시키고 이를 증기발생기 1차 계통(전열관 내부)에 유통시키며 사고를 방지 및 완화하는 기능을 가진 설비들로서, 원자로를 포함한 원자로 냉각재 계통, 원자로 보호 계통, 공학적 안전 설비와 이에 대응하는 계측제어 설비 및 전력 설비 등을 말한다.

〈표 1〉 최근 5년간 원전 사고 · 고장 통계

단위 : 건(%)

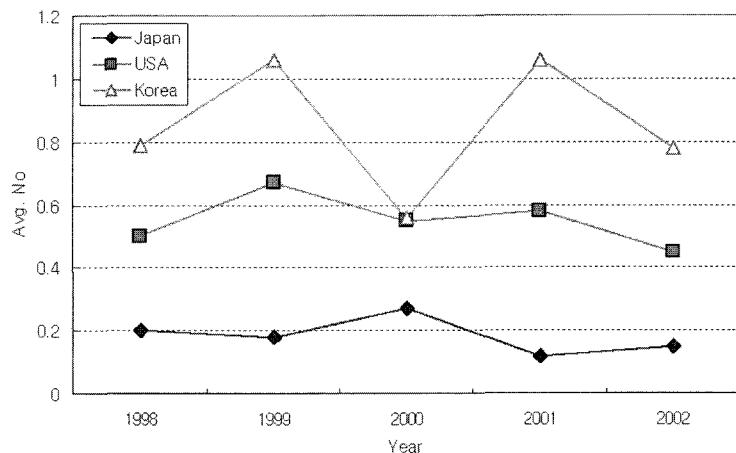
발생시 원자로 과도 상태 유발로 리스크 증가 요인으로 작용하고 있다.

이같이 발생하는 원전의 사고 · 고장과 관련하여 2002년도 12월 원자력안전위원회는 '원전 안전에 영향을 미치는 2차 계통 안전 검사 확대'를 포함한 원전 안전 관리 효율화 방안을 의결하였으며, 2004년 5월 제43차 국정 과제 회의에서 원전의 모든 계통에 대한 안전규제를 일원화함으로써 안전규제의 일관성 및 효율성 향상을 도모하기 위해 산업자원부에서 수행하던 2차 계통 안전규제 업무를 과학기술부에서 수행하도록 결정되었다.

이에 따라 그 동안 과학기술부와 산업자원부간 업무 이관과 관련된 협의를 수행한 결과, 최종적으로 원전 2차 계통에 대한 사용전 검사와 정기 검사를 과학기술부가 수행하는 것으로 합의를(2005.1)하고 이를 위해 원자력법령과 전기사업법령을 개정하기로 하였으며, 기존 업무를 수행하던 한국전기안전공사(KESCO)의 인력을 한국원자력안전기술원(KINS)이 이관받아 원전 2차 계통 검사 업무(사용전 검사, 정기 검사)를 기준의 1차 계통 안전 규제 업무에 통합하여 2005년 5월부터 수행하게 되었다.

따라서 원전의 비계획적인 가동 정지가 주로 터빈·발전기와 같은 2차 계통 설비에서 유발되고 있기 때문에 원전의 안전성에 대한 국민의

연도	분류	1999	2000	2001	2002	2003	계
계통별	1차 계통	8 (38.1)	2 (22.2)	2 (11.8)	6 (28.6)	7 (30.4)	25 (27.5)
	2차 계통	13 (61.9)	7 (77.8)	15 (88.2)	15 (71.4)	16 (69.6)	66 (72.5)



〈그림 1〉 한 · 미 · 일 3국의 원자로 정지 추이 비교

신뢰도 제고를 위해서는 원전 1,2차 계통에 대한 사고 · 고장 원인을 종합적으로 분석하고 이로부터 개선된 안전규제 체계를 도출하여 원전 1,2차 계통 통합 검사 추진 방안을 수립하여 이를 제도화하는 것이 필요하다.

향을 나타내고 있다.

사고 · 고장 취약 계통으로 도출된 터빈-발전기 및 부속 계통 등 2차 계통의 사고 · 고장률이 높기 때문에 2차 계통의 고장을 예방하는 것이 원자력발전소의 안전성과 신뢰성 제고에 효과적일 것으로 판단된다.

최근 5년간 고장의 원인을 보면 〈표 1〉과 같이 2차 계통 설비에서 발생한 경우가 72.5%를 차지하고 있으며, 우리나라의 원자로 정지추이는 미국, 일본 등과 비교할 때 〈그림 1〉에 나타나 있는 바와 같이 일본(NUPEC 자료 이용) 및 미국(NUEG-1350, Vol.15)보다 비교적 높은 편이다.

원전 사고 · 고장 분석

1. 사고 · 고장 현황

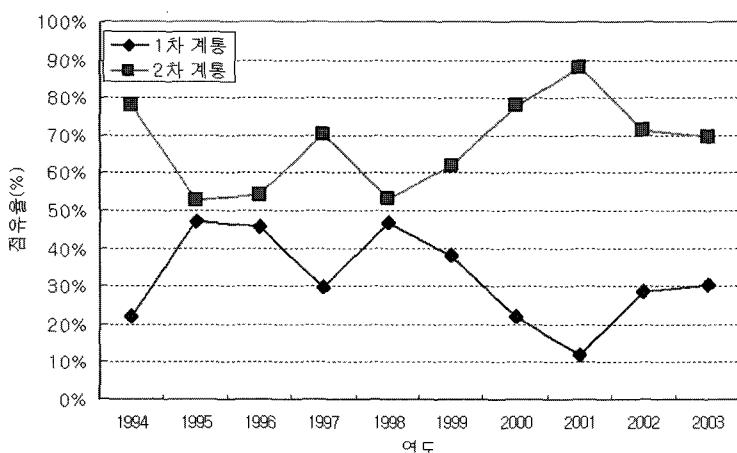
국내외 원전의 사고 · 고장 사례 분석 결과, 국내 원전의 경우 계측 제어 계통, 급수 계통, 증기 및 동력 변환 계통, 전력 계통 등에서 사고 · 고장이 많이 발생한 것으로 나타났으며, 국외의 경우도 유사한 경



〈표 2〉 최근 10년간 계통별 원전 사고·고장 현황

단위: 건(%)

고장 계통	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	계
1차 계통	2	8	11	8	7	8	2	2	6	7	61
	(22.2)	(47.1)	(45.8)	(29.6)	(46.7)	(38.1)	(22.2)	(11.8)	(28.6)	(30.4)	(33.3)
2차 계통	7	9	13	19	8	13	7	15	15	16	122
	(77.8)	(52.9)	(54.2)	(70.4)	(53.3)	(61.9)	(77.8)	(88.2)	(71.4)	(69.6)	(66.7)
합계	9	17	24	27	15	21	9	17	21	23	183



〈그림 2〉 최근 10년간 계통고장 점유율 추이

2. 계통별 사고·고장 현황

최근 수 년간 원전에서 발생하는 사고·고장 중 2차 계통의 고장비중이 〈표 2〉 및 〈그림 2〉에 나타나 있는 바와 같이 70% 내지 80%로서 비교적 높은 수준을 유지하고 있으며, 최근 10년 및 5년간 원전 사고·고장 원인에 대한 분석 결과, 고장 계통 점유율은 2차 계통 설비에서 발생한 경우가 각각 66.7%와 72.5%로서 전체 고장을 중 2차 계통 점유율이 점차 증가하는 추세를 보이고 있다.

3. 원인별 분석

최근 10년간 국내 원자력발전소

에서 발생한 사고·고장을 인적 실수(절차서 오류, 운전원 및 정비원의 실수 등), 기계적 결함(부품의 마모 및 이탈 등), 전기적인 결함(단락, 단선 등) 및 계측 제어 결함(계측 실패, 오신호 발생 등) 등 4가지 원인별로 구분한 결과는 각각 〈표 3〉 및 〈그림 3〉과 같으며, 최근 전기적 결함에 의한 고장 발생의 비중이 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타나 있다.

4. 시설별 분석

고리 1호기가 가동을 시작한 1978년부터 2003년 말까지의 자료를 한국원자력안전기술원의 원전

안전 운영 정보 시스템(OPIS/NEED)을 사용하여 분석한 결과, 〈표 4〉와 같이 4개 시설(계측 및 제어 계통, 급수, 증기 및 동력 변환 계통, 전력 계통, 원자로 계통)에서 상대적으로 많은 고장이 발생하였고, 국내 원전의 2차 계통중 사고·고장 취약 계통으로 도출된 계통은 터빈-발전기 및 부속 계통 등 10개 계통으로 나타났다..

따라서 원전의 안전성 및 운전 신뢰성을 확보하기 위해서는 이와 같이 도출된 사고·고장 취약 계통을 2차 계통 검사 대상 시설 및 항목에 포함하여 2차 계통에 대한 규제 검사 업무를 수행하는 것이 필요하다고 판단된다.

2차 계통 안전 규제 검사 업무 수행 방안

1. 개요

2005년 5월 이전까지 과학기술부/원자력안전기술원에서는 원전 1, 2차 계통에 대한 건설/운영 허가 심사를 수행하고 1차 계통 안전 검사를 원자력법에 따라 수행하였다.

그러나 2차 계통에 대한 심사 결과, 확인을 위한 안전 검사는 원자력법령에 따라 일부(안전 등급 및 내진 등급)만 수행되고, 2차 계통 대부분은 전기사업법령에 따라 산업자원부/전기안전공사에서 수행하여 왔다.

〈표 3〉 고장 원인별 사고 · 고장 빈도

단위 : 건(%)

고장 원인	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
인적 실수	2	4	9	6	2	3	1	1	5	3
	(22.2)	(23.5)	(37.5)	(22.2)	(13.3)	(14.3)	(11.1)	(5.9)	(23.8)	(13.0)
기계 결함	3	5	7	12	8	6	1	10	5	7
	(33.3)	(29.4)	(29.2)	(44.4)	(53.3)	(28.6)	(11.1)	(58.8)	(23.8)	(30.4)
전기 결함	1	3	2	4	2	4	4	3	10	10
	(11.1)	(17.6)	(8.3)	(14.8)	(13.3)	(19.0)	(44.4)	(17.6)	(47.6)	(43.5)
계측 결함	3	5	6	5	3	8	3	3	1	3
	(33.3)	(29.4)	(25.0)	(18.5)	(20.0)	(38.1)	(33.3)	(17.6)	(4.8)	(13.0)
합 계	9	17	24	27	15	21	9	17	21	23

위의 원전 사고 · 고장 분석 결과에 나타나 있는 바와 같이 최근 국내 원전 사고 · 고장의 70% 이상이 터빈/발전기 등 2차 계통 설비의 고장으로 발생되고 있다.

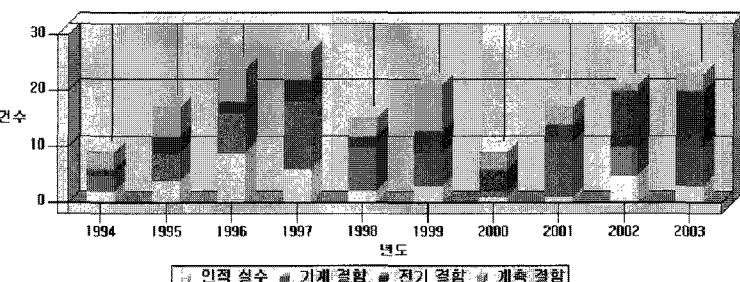
따라서 원전의 전반적인 안전성을 제고하기 위해서는 철저하게 안전성 심사 및 검사가 수행되고 있는 1차 계통 검사방법 등을 참고하여 2차 계통에 대한 안전 검사를 강화하고 규제의 일관성 및 효율화 측면에서 1,2차 계통을 통합한 통합 검사 방안의 수립 및 이행이 필요하다.

2. 검사대상 시설 및 항목

가. 검사 대상 범위

원전 1,2차 계통 통합 안전규제 검사 수행에 따라 2차 계통 검사 대상 시설 및 계통을 재선정할 필요성이 있다.

이를 위해 원전의 안전성 및 운전 신뢰성 확보 측면에서 ① 원자력법령에서 규정하고 있는 안전성 관련 계통 · 설비, ② 전기사업법령에서 이관되는 5개 설비(증기 터빈 설비, 급수 설비, 복수 설비, 보조 설비, 발전기 계통 설비), ③ 원자로 정지 및 과도 상태 유발 취약 계통 · 설비, ④ 발전소 비상 운전시 사용되거나 안전성 분석 보고서(SAR)에 안전성 영향으로 명시되어 있는 계통 · 설비, ⑤ 품질 등급(Q:안전성, T:안전성 영향, R:신뢰성)으로 분



〈그림 3〉 고장 원인별 사고 · 고장 빈도

류된 계통 · 설비 등을 검토하여 검사 대상 시설 및 항목 선정에 반영하였다.

나. 선정 기준

〈표 5〉와 같은 5개 기준에 해당되는 시설 · 계통 · 설비를 통합 검사 대상 시설 및 항목으로 선정하였다. 다만, 원전의 안전 및 운전에 직접적인 영향을 미치지 않는 시설 · 계통 및 항목(예: 조명계통, 폐수처리계통 등)은 대상에서 제외하였다.

다. 검사 대상 시설, 계통 및 항목

위의 선정 기준에 따른 검사 대상 포함 여부를 결정하기 위해, 원전 2차 계통 설비/기기를 포함하고 있는 안전성 분석 보고서 제8장(전력 계통 18개 계통 · 기기), 9장(보조

계통 60개 계통/기기), 10장(동력 변환 계통 27개 계통/기기)의 분류 내용에 따라 총 105개 계통/기기를 검토 대상으로 선정하여 검토하였다.

각 기준에 따른 검사 대상 포함 여부는 기존 관련 법령에 근거한 검사 적용 범위와 안전성 중요도 순서에 따라 배열하였다.

상기 선정 기준의 우선 순위를 고려하여 선정 기준을 적용하였다. 즉, 한 계통이 기준 1과 기준 2에 동시에 포함될 경우, 이 계통은 선정 기준 1에 속하는 것으로 간주하여 검사 대상 시설 및 항목에 포함하였으며, 그 결과는 〈표 6〉와 같고 이와 같이 도출된 2차 계통 설비에 대해서는 사용전 검사 및 정기 검사



〈표 4〉 국내 원전 주요 사고·고장 취약 계통 (2003년말 현재)

시설	세부계통	비고
동력 변환 시설	터빈 발전기(AC 포함) 및 부속 계통	
	복수 및 급수 계통	
	복수기 및 부속 계통	
	주증기 및 부속 계통	
전력 계통 시설	주발전기 및 부속 계통	
	주변압기 및 보조 변압기 계통	
	스위치 앤드 차단기	
보조 계통	제어용 전력 계통(AC & DC)	
	시료 채취 계통	
	압축 공기 계통	

〈표 5〉 통합 검사 대상 선정 기준

기준	내용
1	원자력 관련 법령(고시 포함)에 검사 대상 시설·계통으로 규정되어 있는 시설·계통·설비(행정 조치 사항 포함)
2	전기사업법에 규정되어 있는 검사 대상 시설 및 항목 - 다만, 원전의 안전성과 운전 신뢰성 확보 측면에서 중요하지 않은 시설·계통 및 항목은 배제
3	사고·고장 분석 결과, 취약 설비로 분류된 시설·계통·설비와/또는 원자로/터빈·발전기 출력 감발 혹은 정지 상태 유발 가능성이 높은 시설·계통·설비
4	발전소 비상 운전시 사용되거나, 안전성 분석 보고서(SAR)의 전력 계통(SAR 8장), 보조 계통(SAR 9장) 및 동력 변환 계통(SAR 10장)에 포함된 2차 계통 중 안전성 영향으로 분류된 해당 시설 및 계통
5	품질 등급 Q, T, R로 분류된 시설·계통·설비

가 실시되어 2차 계통 설비에 대한 안전성 및 운전 신뢰성이 확보되어야 한다고 판단된다.

그리고 향후 2차 계통 기기 및 부수 계통의 안전 중요도 및 위험도 정보를 평가하여 그 결과에 따라 정비 규정 도입과 연계하여 검사 대상 및 범위 등을 조정할 필요성이 있다고 판단된다.

라. 검사 방법 및 절차

2차 계통에 대한 검사는 대상 설비/기기 및 시험 결과물(Product)에 대한 기기별 단순 기능 검사를 지양하고, 대상 설비/기기의 기능

건전성 및 안전성을 확보하는 과정 (Process)까지를 고려한 종합적인 계통의 시스템 기반(계통 성능 중심) 검사를 수행하는 것이 필요하다.

각 검사 항목에 대해서 현장 입회 검사 또는 시험 결과 평가 등으로 구분하여 수행함으로써 사업자에게 책임 정비 체제의 구축을 유도하는 규제 검사 방법을 도입하고, 규제 검사 주요 현안에 대해서는 관련 전문위원회의 검토·심의를 거침으로써 규제 검사 수준 제고 및 객관성을 유지하는 것이 필요하다.

검사 절차는 현재 적용하고 있는 1차 계통의 절차를 준용하되 2차 계통 검사 대상 시설·항목에 대한 신규 검사 지침서 및 점검표를 개발하여 활용하며, 계통·시설별로 고장 유발이 잦은 취약 설비에 중점을 두어 검사를 수행하는 것이 필요하다.

2차 계통에 대해서도 품질 보증 검사 제도를 도입하여, 품질 등급별 2차 계통 설비·기기에 대한 생산 품질 보증 검사와 건설·가동중 원전 2차 계통 설비에 대한 품질 등급별 차등화된 품질 보증 검사를 수행하는 것이 필요하다.

또한 원자로 정지 또는 과도 상태를 유발하는 2차 계통 설비 및 품목들을 선별하여 품질 등급을 상향 조정하는 방안에 대한 검토와 함께 사업자의 기자재 생산 과정의 품질 보증 활동을 강화할 필요가 있다.

맺음말

원전 2차 계통에 대한 안전규제 검사 업무를 과학기술부와 산업자원부의 최종 합의 결과에 따라 그동안 산업자원부/전기안전공사에서 수행하던 원전 2차 계통에 대한 검사 업무를 1차 계통에 통합하여 과학기술부/원자력안전기술원에서 종합적으로 수행하도록 결정되었다.

따라서 원전 1,2차 계통에 대한

안전규제 업무를 일원화함으로써 안전규제의 일관성 및 효율성 향상을 도모할 수 있으며, 이를 통하여 원전 1,2차 계통에 대한 안전 심사 업무를 종합적으로 수행하고, 계통·설비에 대한 단순 기능 검사가 아닌 시스템 기반의 계통 성능 중심 검사와 품질 보증 검사를 수행하여 원전의 안전성과 신뢰성을 증진시키고 중복 규제의 가능성을 배제함으로써 사업자의 규제 부담을 경감할 수 있을 것으로 기대한다.

그러나 원전 1,2차 계통에 대한 종합적인 안전규제 검사만으로는 원전의 안전성 및 운전 신뢰성을 향상시키는 데는 한계가 있으므로, 2차 계통 설비에 대한 발전소 운영자의 철저한 정비 및 품질 보증 활동 강화 노력 등이 필요하다.

또한 현재 적용을 전제로 준비중인 보수 규정 등도 철저하게 준비·시행하여 계통·설비의 신뢰성을 향상시키는 노력이 필요하며, 그 결과에 따라 향후 2차 계통 검사 범위 및 항목 등도 조정되는 것이 필요하다고 판단된다.

이제부터 원자력발전소에 대한 안전규제 업무가 1,2차 통합 체제로 전환됨에 따라, 안전규제 활동의 합리성·효율성을 확보하고, 사업자에 대한 업무 부담을 줄이면서 현장에서의 안전 수준이 향상될 수 있도록 제도와 일하는 방식이 개선되어야 할 것이다. ☺

〈표 6〉 2차 계통 검사 대상 시설, 계통 및 항목(안)

시설	계통	검사 대상 항목	비고
전력 계통 시설	발전기 설비 계통	- 주발전기 설비 - 발전기 차단기 설비	
	변압기 설비 계통	- 주변압기 설비 - 소내 보조 변압기 설비 - 대기 보조 변압기 설비	
	스위치 앤드 설비 계통	- 스위치 앤드 차단기 - 스위치 앤드 전원 및 보호 설비	
	디젤 발전기 설비 계통	- 비1E급 비상 디젤 발전기 - 대체 교류 전원용 디젤 발전기	
	직류 전력 설비 계통	- 비1E급 축전지 - 비1E급 충전기	
	무정전 전원 설비 계통	- 비1E급 인버터 - 비1E급 조정용 변압기	
보조 계통 시설	발전소 용수 계통	- 2차 계통 기기 냉각 해수 계통 - 2차 계통 기기 냉각수 계통	
	공정 보조 계통	- 공정 시료 채취 계통 - 보조 증기 계통 - 압축 공기 계통	
동력변환 계통 시설	주증기 계통	- 주증기 격리 밸브 - 주증기 안전 밸브 - 주증기 대기 방출 밸브 - 타빈 우회 계통 - 주증기 배관 - 유량 제한기	
	타빈-발전기 계통	- 발전기(기계 부분) - 타빈	
	타빈 보조 계통	- 타빈 제어유 계통 - 타빈 운활유 계통 - 타빈 축밀봉 계통 - 습분 분리 재밀기 및 초기 계통	
	발전기 보조 계통	- 발전기 자동 전압 조정 계통 - 발전기 고정자 냉각 계통 - 발전기 수소 냉각 계통 - 발전기 가스 제어 및 감시 계통	
	복수 및 급수 계통	- 복수기 계통 (주복수기, 진공 계통, 탈연 계통 포함) - 복수 저장 및 이송 계통 - 주급수 계통 - 보조 급수 계통 - 순환수 계통 - 증기발생기 취출 계통	
	계측 제어 계통	- 보조 계통 및 동력 변환 계통 관련 계측 제어 설비 계통	모든 계통 공통 적용
공통	지지대 및 방진기	- 유체 계통 지지대 및 방진기	
	배관 계통	- 유체 계통 기기·배관 융접/비파괴 검사	
	구조물	- 증기 타빈 건물 기초 지반 및 구조	사용전 검사