

중수로용 표준기술지침서 개발을 위한 원자력발전소의 기존 운전모드 비교

The Current Operational Modes of Nuclear Power Plants to Develop Standard Technical Specifications for Pressurized Heavy Water Reactors

류정동, 김기용, 성창경

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-15

요 약

원전의 기술지침서에는 발전소 운전 상태를 나타내는 운전모드가 정의되어 있다. 이러한 운전모드와 관련한 중수로용 표준 운전모드를 선정하기 위한 기초자료로써, WH/CE형 원전, Framatome형 원전, 가압중수로형 원전 그리고 SOE문서 등에서 각각 언급하고 있는 운전모드를 비교 및 검토하였다.

Abstract

In Technical Specifications for nuclear power plants, Operational Modes are defined by the combination of conditions with respect to the variables of plant status. Operational Modes of WH/CE, Framatome, PHWR type and SOE documents are described and compared with the characteristics. This result will be provided as the basic data for the selection of Standard Operational Modes for Pressurized Heavy Water Reactors

1. 서 론

원자력발전소의 안전성을 확보하고 운전의 편의성 및 효율성을 증대시키기 위해, 운전지침을 제시하는 운영기술지침서는 반드시 있어야한다. 이는 원자력법 제21조(운영허가) 2항 및 10CFR50.36 (Technical Specifications)을 근거로 한 것으로 원자력발전소의 안전운전을 얻기 위한 문서이다. 기술지침서에는 안전제한치(Safety Limits), 안전계통 제한설정치(Limiting Safety System Setting), 운전제한조건(Limiting Condition for Operation), 점검요구사항(Surveillance Requirement) 그리고 설계사항(Design Features) 등이 있다. 특히 운전제한조건은 발전소 안전에 핵심적인 사항이고 가장 많은 분량을 차지하고 있다. 이 운전제한조건이 적용되고 준수되는 발전소의 상태를 명시한 것이 운전모드이다.[1]

발전소는 다양한 출력, 온도, 또는 압력 등의 조건하에서 운전 가능하며 이러한 조건들을 조합하여 정지상태에서 출력운전까지의 발전소 운전형태를 몇 개의 운전모드로 나타낸다. 그리고 설정된 운전모드는 운영기술지침서 및 비상운전절차서 등 발전소의 각종 절차서에서 사용되고 있

다. 특히 기술지침서의 핵심이 되는 운전제한조건이 적용되는 근본 바탕을 설정하는데 사용하고 있다.

본 연구는 중수로용 표준운영기술지침서 개발을 위한 연구수행의 초기 단계로서, 원전 노형별로 다양하게 정의되어 있는 운전모드를 표준화하고, 최적화된 중수로용 운전모드 선정시 참조되는 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 운전중 혹은 개발 과정중에 있는 국내·외 발전소의 운전모드를 비교 및 검토하고 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 본 론

운전모드는 발전소 상태의 여러 조건들을 조합하여 설정했기 때문에 발전소 노형에 따라 매우 다양하다. 현재, 국내에서 가동중인 발전소의 운전모드를 살펴보면, CE형 및 WH형 가압경수로로는 6개, Framatome형 가압경수로로는 9개를 사용하고 있으며, 가압중수로인 월성 2, 3, 4호기는 5개를 사용하고 있고 월성 1 호기는 명확하게 운전모드를 설정하고 있지 않은 상태에 있다[2~5]. 우선, 운전모드의 개념을 처음으로 그리고 각종 운전 절차서에 폭넓게 적용하여 사용하고 있으며, 월성 2, 3, 4호기 운전모드의 바탕이 되는 가압경수로의 운전모드에 관해 살펴보았다[6].

가. 가압경수로의 운전모드

(1) WH형 및 CE형 원전

2000년 7월에 Nureg-1431을 근거로 하여 한전이 작성한 WH형 원전 표준운영기술지침서를 과기부가 승인함으로써, 국내 가압경수로(WH형/CE형) 운영기술지침서의 표준안이 완성되었다. 이 표준운영기술지침서에 명시된 운전모드는 WH형과 CE형 모두가 동일하게 나타나 있으므로 WH형 원전 표준운영기술지침서의 운전모드만을 언급하기로 한다. 표 1에 나타난 바와 같이 WH형 원전 운전모드는 6개로 구분된다. 운전모드를 구분하는 기준은 노심반응도(Keff), 출력 그리고 냉각재평균온도 등 3가지를 기준으로 하여 정의하고 있다. 이는 원자로 1차계통의 에너지 상태에 따라 분류한 것으로 출력운전인 운전모드 1에서 1차측 에너지가 가장 크며, 핵연료 재장전인 운전모드 6에서 에너지가 가장 작다.

노심반응도를 기준으로 노심이 임계 상태이면 핵분열에 의해 지속적인 에너지 생성이 일어난다. 따라서 2차계통을 통해 지속적으로 1차측에서 발생하는 열을 제거해야 노심 건전성을 유지할 수 있다. 반면에, 노심이 미임계로 유지될 경우 붕괴열이 발생되기는 하지만 지속적인 에너지 생성은 일어나지 않으며, 1차계통의 노심 및 냉각재에 저장된 열에너지만 제거하면 노심 건전성이 보장된다. WH형 원전에서는 노심반응도 0.99를 기준으로 운전모드 1,2(Keff 0.99 이상)와 운전모드 3,4,5(Keff 0.99 미만)로 구분한다. 반응도가 0.99 이상일 경우 약간의 반응도 투입으로 임계도 달이 충분히 가능하며, 출력 상승 및 지속적인 출력 운전이 가능하다. 따라서 운전모드 1, 2에서는 지속적인 출력 운전에서 요구되는 기기들이 운전될 것을 요구한다.(예 : 모든 RCS 유로의 운전요구, 비상시 원자로 정지를 위해 제어봉 계통의 운전 가능성 요구, 최저 RCS 온도제한 적용). 그리고, 열출력을 기준으로 운전모드 1과 2를 구분한다. 운전모드 2에서는 열출력이 낮기 때문에 노심 출력 분포에 대한 제한을 적용하지 않는다. 운전모드 2에서 출력분포가 고르지 않더라도 평균출력이 낮으므로 국부적인 열속이 안전제한치 이내로 유지되기 때문이다.

운전모드 3, 4, 5는 반응도 조건이 0.99 이하인 경우로써 원자로가 정지된 상태라고 볼 수 있다.

1차측의 노심 붕괴열 및 노심과 RCS 냉각재에 저장된 에너지만 제거하면 발전소의 안전이 확보된다. 노심에서 발생하는 열이 적기 때문에 전체 RCS 유로 중 일부 유로의 운전 정지가 허용된다. 그리고 RCS 냉각재 평균온도를 기준으로 운전모드 3과 4와 5를 구분한다. 잔열제거계통으로 열제거를 하는 시점을 기준으로 운전모드 3과 운전모드 4가 나뉘어진다. 잔열제거펌프의 공급압력이 낮기 때문에 잔열제거계통을 운전하기 위해서는 RCS 압력을 낮추어야 한다. 그러나, RCS 온도를 낮추지 않고 압력만 낮출 경우 RCS내의 냉각재가 포화상태에 도달하여 비등이 발생할 수 있다. 따라서 비등이 발생하지 않도록 하기 위해 RCS 온도를 낮추어야 한다. 잔열제거계통의 운전이 허용되는 최대 온도가 운전모드 4의 상한값인 350°F이다. 운전모드 5에서는 부분 증수 운전이 허용된다. 이를 위해서는 냉각재를 대기압까지 감압해야 한다. 대기압에서 냉각재 비등을 방지하기 위해서 RCS 온도를 대기압에서 물의 비등점인 212°F보다 낮은 온도로 유지해야 한다. 따라서 운전모드 5의 온도 상한 값은 200°F로 설정되어 있다. 한편, 운전모드 6은 핵연료를 재장전하는 상태로써 원자로 용기 헤드볼트가 완전하게 조여져 있지 않은 상태로 1차계통 가압이 불가능한 상태이다.

운전모드	명 칭	반응도 조건 (k_{eff})	정격열출력 ⁽¹⁾ (%)	원자로냉각재 평균온도 (°F)
1	출력 운전	≥ 0.99	> 5	해당 없음
2	기동	≥ 0.99	≤ 5	해당 없음
3	고온 대기	< 0.99	해당 없음	$\geq [350]$
4	고온정지 ⁽²⁾	< 0.99	해당 없음	$[350] > T_{avg} > [200]$
5	저온정지 ⁽²⁾	< 0.99	해당 없음	$\leq [200]$
6	핵연료 재장전 ⁽³⁾	해당 없음	해당 없음	해당 없음

주(1) 붕괴열은 제외한다.

주(2) 모든 원자로용기 헤드 잠금볼트는 완전하게 조여져 있다.

주(3) 하나 이상의 원자로용기 헤드 잠금볼트가 완전하게 조여져 있지 않다.

표 1. WH형 가압경수로의 운전모드

(2) Framatome형 원전(울진 1·2호기)

프랑스 원전에 대한 기술지침서는 미국 NRC로부터 Westinghouse가 승인 받은 기술지침서의 내용에 따라 적용하여 왔으나, 1980년 이후에는 새로운 양식으로 기술지침서를 사용하고 있다. 프랑스의 기술지침서는 미국에서 채택하여 사용중인 사고해석을 기본으로 한 기술지침서 내용의 개념을 포함하고 있으며, 과거 운전 경험을 토대로 장기적인 발전소의 영향요소와 부하중 증운전 등 현재 사용되는 설비중 사고해석과는 무관하지만 안전성에 영향을 줄 수 있는 항목에

대해서도 기술지침서에서 언급하고 있다. 현재, 국내에서 2개의 호기가 운전중인 Framatome 원전 울진 1, 2호기 기술지침서의 전반적인 내용은 미국의 Standard Technical Specifications (Nureg-0452, Revision2)과 비슷한 사항들로 구성되어 있다.

Framatome형 원전의 운전모드는 표 2에 나타내었다. WH형 혹은 CE형 운전모드와는 다르게 9개로 구분하고 있다. 1)반응도 조건(노심임계여부 및 제어봉과 정지봉의 위치), 2)원자로 출력, 3)냉각재온도 및 압력 그리고 4)RHR 운전조건에 따라 9종류의 운전모드를 분류하고 있는데, 그 배경은 원자로냉각재의 과냉각 상태를 구분하여 운전모드 등에 반영한 것이 특징이다. 그리고, 운전 중 기기고장 등으로 인하여 저온정지상태에서 보수하는 과정에 대한 발전소 상태를 별도 운전모드(1. 연료교체정지-원자로용기덮개 볼트 풀립 혹은 제거)로 분류하였다.

울진 1·2호기 운영기술지침서에는 지금까지 언급한 일반적인 운전모드(울진 1·2호기 Tech. Spec.에서는 이 모드를 Standard Operating Modes라고 함)외에 조치운전모드(Fallback mode)가 있다. 이것은 안전관련 중요기기가 운전 불가능할 때 발전소가 최적의 안전여유를 가질 수 있도록 하는 운전모드라고 정의된다. 어떤 운전제한조건을 위반했을 때, 발전소 안전을 확보하기 위해 해당 운전제한조건이 적용되지 않는 모드로 진입한다. 운전제한조건이 적용되지 않는 이 때의 모드가 조치운전모드이다. 이러한 개념은 대부분의 모든 기술지침서에서 언급하고 있는 사항으로 울진 1·2호기 기술지침서에서 만 언급하는 사항은 아니다. 다만, 9개의 운전모드로 세분화되어 있어 적용할 수 있는 조치운전모드 즉, 해당 운전제한조건이 적용되지 않는 운전모드가 다양함으로 인해 급격하게 발전소 상태를 변경하지 않아도 된다는 장점이 있다. 그리고, 아래와 같은 개념을 갖고 있는 조치운전시간(Fallback Time)이 있어서 운전제한조건을 위반했을 때, 발전소 운영자가 좀 더 융통성을 갖고서 운전에 임할 수 있다.

$$\text{조치운전시간(Fallback Time)} = \text{제한시간(Completion Time)} + \text{과도시간(Transition Time)}$$

제한시간은 운전제한조건 위반시 취해야 하는 조치요구사항을 수행하는 데 필요한 시간을 말하는 것이고, 과도시간은 운전제한조건이 적용되지 않는 운전모드로 진입하는데 걸리는 시간을 나타내는 것이다. WH형/CE형의 기술지침서에는 운전제한조건 위반시 취해야 할 조치요구사항들이 제한시간과 함께 자세하게 명시되어 있다. 즉, 제한시간과 과도시간이 명확하게 구분되어 있어 발전소 운전의 명확성을 기하고 있다. 그러나 울진 1·2호기 기술지침서에는 대부분 조치운전모드와 조치운전시간만을 명시하여 운전의 명확성은 없지만 운전의 유연성을 갖고 있다.

Framatome사의 울진 1, 2호기 기술지침서의 특징인 조치운전모드와 조치운전시간은 운전의 유연성을 확보하게 함으로 인해 경제성 측면에서는 상당한 장점이 될 수 있다..

운전모드 및 명칭	중성자 특성		압력/온도
	노심임계편차	제어봉위치	
1. 연료교체정지 (원자로용기덮개 볼트 풀림 혹은 제거)	$\geq 5,000\text{pcm}$ or 붕소농도 $\geq 2,300\text{ppm}$	모든 군 삽입	$10 \leq T \leq 60^\circ\text{C}$ 대기압
2.정비저온정지 (원자로냉각재계통 개방)	$\geq 5,000\text{pcm}$ (붕소농도 $\geq 2,300\text{ppm}$)	모든 군 삽입	$10 \leq T \leq 70^\circ\text{C}$ 대기압
3.정상저온정지	$\geq 1,000\text{pcm}$	(붕소농도 $> 100\text{pcm}$) SA, SB 및 CB군 인출	$10 \leq T \leq 90^\circ\text{C}$ $1 \leq P \leq 28\text{bar}$ RCV에 의한 압력제어(가능하면)
4.잔열제거계통연결 단상중간정지	$\geq 1,000\text{pcm}$	SA, SB 및 CB군 인출	$90 \leq T \leq 177^\circ\text{C}$ $24 \leq P \leq 28\text{bar}$ RCV에 의한 압력제어
5.잔열제거계통연결 2상 중간정지	$\geq 1,000\text{pcm}$	SA, SB 및 CB군 인출	$120 \leq T \leq 177^\circ\text{C}$ $24 \leq P \leq 28 \text{ bar}$ 가압기에 의한 압력제어
6.잔열제거계통격리정상 중간정지	$\geq 1,000\text{pcm}$	SA, SB 및 CB군 인출	$177 \leq T \leq 284^\circ\text{C}$ $24 \leq P \leq 155\text{bar}$ 가압기에 의한 압력제어
7.고온정지 $P = 0$	$\geq 1,000 \text{ pcm}$ 및 $\geq \text{F16-2}$ 의 임계편차	SA, SB 인출	$T=286^\circ\text{C} (+3^\circ\text{C}, -2^\circ\text{C})$ $P=155 \text{ bar}$ 가압기에 의한 압력제어 (자동)
8.고온대기 $P \leq 2\% \text{RP}$	0	SA,SB인출, 제어군은 삽입한계치이상. (수동)	$T=286^\circ\text{C} (+3^\circ\text{C}, -2^\circ\text{C})$ $P=155 \text{ bar}$ 가압기에 의한 압력제어 (자동)
9.출력운전 $2\% \text{RP} \leq P \leq \text{RP}$	0	SA, SB 인출, 제어군은 삽입한계치이상. (수동)	$T=286^\circ\text{C} (+3^\circ\text{C}, -2^\circ\text{C})$ $P=155 \text{ bar}$ 가압기에 의한 압력제어 (자동)

표 2. 울진 1·2호기의 운전모드

나. 가압중수로의 운전모드

가압중수로(CANDU)의 기술 보유국인 캐나다의 원자력 법규 및 규제체계는 미국은 물론 우리나라와도 상당한 차이를 보이고 있어서, 기술지침서를 사용하고 있지 않다. 이것으로 인해서, 중수로의 운전모드는 경수로의 운전모드에 비해 상당히 취약하고 그 내용의 구체성을 띠고 있지 못하다[6].

(1) 월성 1호기

1983년 월성 1호기를 상업운전 할 때에는 운전제한조건을 명시해 놓은 기술지침서 성격의 문서로 Operating Policy and Principle (OP&P)가 사용되고 있다. OP&P에 기술되어 있는 운전모드는 명확하게 정의되어 있지 않다. 출력운전, 고온정지, 상온정지, 보증정지, 모든 운전모드, 정상운전, 냉각재계통의 가열 및 냉각시, 냉각재온도 100℃ 이상, 2%출력이상, 냉각재 온도 149℃ 이상, 냉각재온도 150℃ 이상, 사용후 연료가 이송시 등으로 대단히 복잡하게 기술되어 있어서 운전제한조건이 적용될 수 있는 운전모드라고 할 수 없다. 이러한 문제점등으로 인해 운전모드는 물론 월성 1호기 OP&P 자체를 전면 개정하는 연구가 현재 수행되고 있으며, 국내 타원전과의 규제의 동질성 및 형평성을 유지하기 위해 운영기술지침서로의 전환 작업이 현재 진행 중에 있다. 그러므로 월성 1호기의 운전모드는 본 연구의 논의 대상에서 제외하기로 한다.

(2) 월성 2, 3, 4호기

본 연구에서 사용한 월성 2, 3, 4 호기의 운전모드는 현재 과학기술부 심사중에 있는 운영기술지침서에서 기술되어 있는 것이다. 이 운영기술지침서는 2001년 내에 인허가 심사가 완료되어 월성 원전에서 사용할 예정에 있다.

캐나다 원자력법은 중수로로는 미국의 원자력법 체계와는 다른 차이를 보이고 있어 운영기술지침서를 적용하고 있지 않고 있다. 이로 인해 경수로 운영기술지침서에 사용한 운전모드를 적용하지 않았다. 그러나 국내에서는 원자력 규제의 형평성과 일관성을 유지하고 원전 안전성을 향상하기 위해 96년 11월 월성 2호기를 시작으로 하여 경수로형 운영기술지침서 형식에 따라 경수로형 운전모드를 적용하고 있다.

표 3에 나타난 바와 같이 월성 2, 3, 4 호기의 운전모드는 5개로 구분된다. 중수로 원전은 출력 운전중에 핵연료 재장전을 수행하므로 경수로형 운전모드 6(핵연료 재장전)이 삭제되어 있다. 운전모드를 구분하는 기준으로 1)원자로 출력, 2)냉각재출구모관 온도 그리고 3)반응도조건 등 3가지를 기준으로 하여 정의하고 있다. 원자로 1차계통의 에너지 상태에 따라 분류한 것으로 출력운전인 운전모드 1에서 1차측 에너지가 가장 크며, 보증정지 운전모드 5에서 에너지가 가장 작다. 이는 경수로 운전모드와 상당히 유사하며 경수로형 운영기술지침서를 참조한 것이다. 그리고 월성 2호기 운영기술지침서 정의 편에서는 5가지의 운전모드 형태 이외에 다음과 같은 “공통모드”가 명시되어 있다.

“공통모드” - 다수의 기기 또는 계통에 직접적인 영향을 주는 사건이나 메카니즘에 대한 표현.

주 : 공통모드에 속하는 사건이나 메카니즘의 사례는 다음과 같다.

- 가. 공통외부 사건 : 지진, 홍수, 화재
- 나. 공통내부 사건 : 설계 결함, 제작 결함, 시공결함
- 다. 인적 개입 : 정비 또는 운전오류

그러나, 위의 공통모드는 기술지침서 내에서 언급하는 운전중의 발전소 상태를 나타내는 것이 아니라, 사건 내지는 사고의 원인을 분류 한 것으로 일반적인 운전모드의 범주에 속하지 않는다.

운전모드	원자로 출력	냉각재출구모관 온도(°C)	반응도 조건
1. 출력운전	>2 %	>260	임계
2. 저출력 대기	≤2 %	>100	임계
3. 고온정지	0	>100	미임계
4. 상온 정지	0	≤100	미임계
5. 보증 정지	0	≤60	미임계

표 3. 월성 2, 3, 4 호기의 운전모드

(3) SOE (Safe Operating Envelope)

최근 캐나다의 온타리오 하이드로사(OHN)에서 Ontario Hydro Nuclear Asset Optimization Program (NAOP)의 일환으로 운영기술지침서를 채택키로 결정됨에 따라 중수로 관련 문서의 일대변혁이 예상된다. 이 종합개선계획중 주목할 만한 사항으로 “안전운전체계(Safe Operating Envelope)”로 명명된 SOE문서가 있다. SOE는 미국에서 개발한 개선된 표준기술지침서(ISTS: Improved Standard Technical Specifications, Nureg-1431)의 형식을 따르고 있는데, 원전의 안전 운전을 보장하기 위해 지켜야할 주요 안전변수 및 안전관련 계통의 운전 요건의 제한 범위를 의미한다.

기술지침서에 SOE의 모든 내용이 포함되는 것은 아니지만, SOE를 준수하기 위해 운전원이 지켜야 하는 운전제한치(LCO) 및 위반시 수행해야 하는 조치(Condition/Required Action)가 기술되어 있다. 이 사업은 운영관련문서의 체계 수립에 목적을 두고 있으며, 이러한 문서체계 내에 새로운 형식의 기술지침서를 수용하고 있다는 사실에 주목해야 할 필요가 있다. 사실, 캐나다 보다 우리나라가 먼저 중수로원전에 기술지침서를 적용하였지만, 성공적인 사항으로 평가되지 않는 것이 사실이다. 중수로원전 기술지침서 적용 중에 미비한 점이 확인된다면, 끊임없이 보완하고 개선하려는 노력이 유지되어야 한다. 이 노력의 한 방편으로 SOE 문서를 검토하고 중수로 기술지침서 개선연구가 진행 중에 있다. 현재까지의 연구결과는 다음과 같다.

SOE내의 운전모드는 표 4에 나타낸 바와 같이 4개로 구분된다. 출력운전중에 핵연료 재장전을

수행하므로 핵연료 재장전과 관련한 운전모드가 없음은 물론 보증정지와 관련한 운전모드도 없다. 운전모드를 구분하는 기준으로 원자로 출력, 냉각재출구모관 온도 그리고 반응도조건 등 3가지를 기준으로 하여 정의하고 있다. 미국의 기술지침서는 운전제한조건(Limiting Condition for Operation)과 운전제한조건이 적용되는 운전모드 그리고 운전제한조건 불만족시에 필요한 조치요구사항(Required Action, 제한 시간 포함)으로 구성되어 있다. 미국의 기술지침서에서 “운전가능”하다는 의미는 최소한의 안전 기능이 수행이 가능하다는 것을 의미한다. 즉, 운전제한조건을 위반하게 되면 기술지침서에 기술된 제한시간내에 조치사항을 수행해야 한다. 다시 말해서, 미국의 기술지침서는 기능수행 부분만 강조한다. 그러나 SOE의 경우에는 기능수행부분을 강조한 것 외에 추가로 신뢰도(reliability)를 고려하고 있다. 조치요구사항을 수행하는데 필요한 제한시간을 신뢰도 요건에 따라 계산한 것이다. 또한, 운전제한조건을 위반하지 않았더라도 다중성(Redundancy)를 상실하게 되면 Impaired Condition of Operation (ICO) 상태가 되어 이에 대한 복구 조치를 수행해야 한다[7].

번호	명 칭	원자로 상태	열수송 상태
1	출력운전 (Power Operation)	0.1 ~ 100 % FP	RIH Temp ≥ 90°C
2	고온정지 (Hot Shutdown)	< 0.1 %FP	RIH Temp ≥ 90°C
3	저온정지 (Cold Shutdown)	< 0.1 %FP	28°C < RIH Temp < 90°C
4	감압 (Depressurized)	< 0.1 %FP	HT Pressure = 0 MPa(g)

표 4. SOE의 운전모드

다. 문제점 검토

미국 가압경수로에는 6개의 완전히 고정되어 있는 운전모드를 사용하고 있다. 이 확정된 운전모드는 원자력발전소의 최상위 문서인 기술지침서에 정의되어 있다.(그림1참조) 이것으로 인하여 기술요건서(Technical Requirement Manual), 비상운전절차서, 기술배경서 발전소 하부 절차서 등에는 물론이고 행정관련문서에서도 확정된 운전모드가 명시되어 각종 조치가 정형화되어 이루어진다. 발전소 대부분의 문서에서 운전모드를 언급하여 운전모드 변경절차의 복잡함으로 인해, 운전모드를 변경하는 데 많은 어려움을 겪고 있다. 이를 해결하기 위해서는 운전모드를 언급하는 문서를 간소화시켜야 한다. 그리고, 운전제한조건 위반시, 운전모드의 종류가 Framatome형 등의 9모드 보다 6모드만으로 분류되어 있는 발전소에서 더욱 급격하게 발전소상태가 변화하게된다.

즉, 운전모드의 종류가 적음으로 인해서 운전의 유연성 및 융통성이 떨어진다. 이로 인하여, 운전모드의 종류가 적은 발전소 운영자는 경제성 측면에서는 불이익을 감수할 수밖에 없다. 그러므로, 안전성 측면만을 고려하는 것이 아니라 경제성을 고려한다면 더욱 향상된 운전모드를 얻을 수 있다.

월성 1호기는 운전모드가 명확하게 설정되어 있지 않음으로 인해, 운전제한조건을 적용할 수가 없는 상태이다. 향후에 중수로용 표준 운전모드를 설정하고, 중수로용 표준운영기술지서가 개발된다면, 즉시 월성 1호기의 운영기술지침서가 작성되어야 한다.

월성 2, 3, 4호기의 운전모드는 미국 가압경수로의 운전모드를 그대로 적용한 것으로 상당한 문제점을 갖고 있다. 발전소의 노형이 중수로와 경수로로 근원적인 차이를 보이고 있는데도, 규제의 형평성과 운전모드선정기술의 미비로 인해 경수로 운전모드를 그대로 적용하고 있다. 이것은 중수로 자체의 특성을 무시한 것이고, 원자로 특성을 무시한채 운전모드 변경시 발생하는 과도상태로 인해 위험도는 증가 될 수밖에 없다. 그러므로, 중수호가 갖는 특성을 고려하여 운전모드를 설정해야 한다.

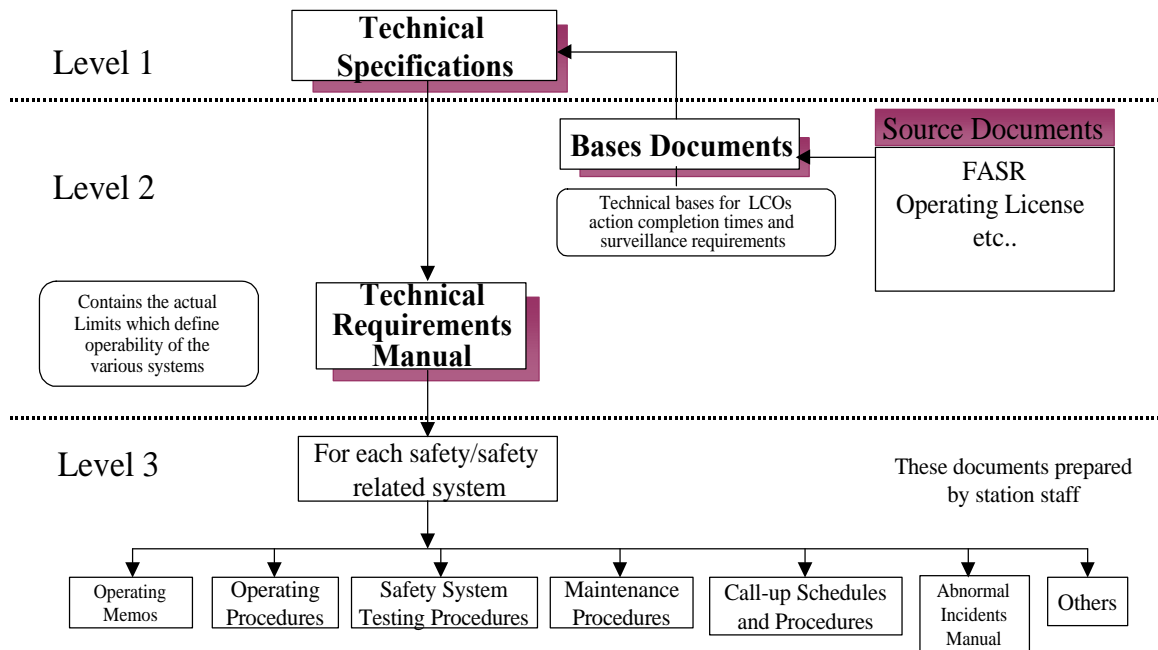


그림 1. 미국 가압경수로의 문서 체계

3. 결론 및 향후연구내용

기술지침서의 운전제한조건을 운영하는데 있어, 큰 축을 이루고 있는 운전모드에 관하여 살펴 보았다. 특히, 국내 가동 중에 있는 원전의 운전모드를 중심으로 하여 국외에서 개발 중에 있는 운전모드의 특징을 살펴보고, 이를 비교 및 검토한 결과를 제시하였다.

운전제한조건 위반에 따른 운전모드 변경으로 인해 안전성과 무관한 사항들이 제약받아 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 운전제한조건 위반시 변경되는 운전모드의 범위를 과도하게

설정하지 않고, 다양한 운전모드의 종류를 선정해야 한다. 원전의 경제성을 증대시키는 동시에 안전성을 증대하기 위해서는 고정된 운전모드 대신 가변적이고 유동적인 운전모드에 관해 연구해야 한다. 이러한 관점은 해외에서도 진행되고 있으며, 본 연구의 향후연구의 한 틀을 이룰 것이다. 향후 연구 방향은 다음과 같다.

먼저, SOE, Gentilly2의 OP&P 그리고 중국 진산원전 기술지침서 등의 중수로원전 보유국의 운전모드의 선정기술기준을 파악하고 그에 따른 운전모드변경에 필요한 제한시간 완료점에 대한 안전성분석을 통해 그 타당성을 판단할 것이다. 그리고, 위험도 정보 기술지침서(Risk-Informed Tech. Spec.)에 관한 연구를 수행하여 원전의 위험도와 운전모드 개수를 연계시켜 최적의 운전모드 개수를 선정하고자 한다. 이에 관한 예시를 표 5에 나타내었다. 그후, 최종적으로는 중수로용 표준운영기술지침서를 개발할 예정이다.

위험도(CDF) \ 운전모드 개수	높음 (10^{-4})	보통(10^{-5})	낮음(10^{-6})
4 Mode	○		
6 Mode	○	○	
9 Mode	○	○	○
현행유지	○	○	○

표 5. Risk Informed에 근거한 원전 위험도와 운전모드 개수 비교 예시

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 연구개발 중장기 과제중 “중수로 운전제한 조건 및 운전모드 설정”과제의 일환으로 수행하였다.

참고문헌

1. EPRI NP-4498 Volume 1, "The Reactor Analysis Support Package", April 1986
2. 한국전력공사 한전기술-0005, “표준운영기술지침서”, 2000
3. 한국전력공사, “울진 1·2호기 기술지침서”, 1995
4. 한국전력공사, “월성원자력 2호기 운영기술지침서 Rev 1” 1998
5. 한국전력공사, “원자력 3호기 운영기술지침서”, 1985
6. 과학기술부 “운전 및 시험 분석 평가기술 개발(I) - 국내원전 기술지침서 표준화 연구“ 1995
7. Ontario Hydro Nuclear, “Bruce B Safe Operating Envelope” 1999