

## 중수로 표준 운전모드 설정 및 기술배경

### Technical Bases for the Standard Operational Modes of CANDU

류정동, 성창경

전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

원자력발전소의 운영기술지침서에는 발전소 운전 상태를 나타내는 운전모드가 명시되어 있다. 본 논문에서는 운전모드의 이론적 배경과 국내 중수로용 표준운영기술지침서 개발을 위한 중수로용 표준 운전모드를 개발하는 과정과 그 연구 내용을 요약 서술하였다. 연구 개발된 결과는 중수로용 표준 운전모드를 선정하기 위한 기초자료로 활용되어 중수로용 표준 운전제한조건을 선정하는 데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

#### Abstract

In Technical Specifications for nuclear power plants, Operational Modes are specified by the combination of conditions with respect to the variables of plant status. This paper theoretically defines and summarizes the results of standard Operational Mode for the Improved Standard Technical Specification of CANDU in Korea as a part of "Establishment of CANDU Limiting Condition for Operation and Operational Mode" project. This result will be provided as the basic data for the selection of Standard Limiting Conditions for Operation for Pressurized Heavy Water Reactors

#### I. 서 론

원전의 안전을 보장하기 위한 방법 중 하나로서, 국내의 원자력발전소에서는 운영기술지침서를 적용하고 있다. 운영기술지침서에는 안전해석을 기초로 한 가동중 원전의 안전제한치, 운전제한조건, 조치요구사항 및 점검요구사항 등이 규정되어 있으며, 원전 사업자는 이를 준수함으로써 안전성을 확보할 수 있다. 이러한 내용은 "원자력법 제21조 (운영허가, 2001.1.16)", "원자력법시행규칙 제16조 (운영기술지침서 등의 기재사항, 2001. 7. 25)" 및 "미국 10CFR50.36 Technical Specifications (96.8.28)" 등에 기술되어 있어 법적 효력을 갖는 강제 조항이다.

운영기술지침서에 기술되어야 할 내용 중, 운전모드를 제외한, 안전제한치, 운전제한조건, 조치

요구사항 및 점검요구사항 등에 관해서는 많은 연구가 수행되어 가시적인 성과를 이루었지만, 운전모드에 관한 인식 부족으로 인해 운전모드 자체에 관한 연구는 미미한 것이 사실이다. 그러나, 운전모드는 설정된 운전제한조건이 준수되고 점검요구사항이 실행되는 발전소의 운전상태를 말하며, 발전소 안전운전의 기본요소가 되는 운전제한조건, 조치요구사항 및 점검요구사항과 밀접한 관련이 있는 것으로 가볍게 간과할 수 있는 요소는 아니다.

국내 가압경수로 원전의 운전모드는 미국의 표준기술지침서(Standard Technical Specifications, NUREG-0452)를 기반으로 하여, 노형에 따라 미국의 개선된 표준기술지침서인 NUREG-1431과 NUREG-1432의 형태를 각각 취하고 있다. 이는 가압경수로 기술보유국인 미국 원전의 운전경험과 이를 토대로 하여 결정된 미국의 운전모드 체계를 그대로 따른 것이다. 그러나, 가압중수로의 운전모드는 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 캐나다의 원전 규제 체계가 미국의 체계와 다름으로 인해, 가압중수로의 기술 보유국인 캐나다에는 운전모드는 물론, 기술지침서 자체가 존재하지 않는다. 이로 인해, 국내 가압중수로에서 사용하는 기술지침서는 국내 기술로 자체 개발되었으며 문제점을 갖고 있는 것이 사실이다. 운전모드 또한 문제점을 갖고 있어 몇 차례의 수정을 거듭하는 등의 시행착오를 겪었다.

국내 중수로용 기술지침서가 갖고 있는 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 특히, 기존의 가압경수로 원전 운영기술지침서와 동일한 체계의 중수로용 운영기술지침서를 개발하는 표준화 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 중수로 원전 운영기술지침서 표준화 작업의 일환으로 중수로용 표준 운전모드를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

## II. 본론

### 1. 운전모드의 개념

아래에서 서술하는 운영기술지침서와 운전모드의 개념 및 기능에 관해 분석한 내용은 주로 미국 원전에서 사용되고 있는 운전모드를 근거로 한 것이다. 현재, 국내의 모든 가압경수로 원전에서 이러한 사항을 적용하고 있으며, 가압중수로 원전인 월성 2, 3, 4호기에도 적용하고 있는 것으로 밝혀졌다.

#### 1.1 운영기술지침서의 심층방어전략

원전의 안전성 확보를 위한 원전 설계 기본원칙(Fundamental Principles) 중에서 가장 중요하게 다루는 것이 심층방어전략(Strategy of Defense in Depth)이다. 이 전략은 원전 설계뿐만 아니라, 원전의 운전 부분에서도 기본 배경이 되는 사항이다. 아래의 그림 1은 원전 운전의 핵심이 되는 문서인 운영기술지침서에서 사용되는 심층방어전략을 나타낸 것으로 안전운전 체계를 나타낸 것이다. 이 체계도는 기기의 고장이나 운전원 실수가 발생하더라도 개인이나 공중에 큰 피해를 주지 않음은 물론, 안정적이고 안전한 운전을 하기 위해 적절한 조치가 중첩되어 수행되는 다단계 방호(Multiple Levels of Protection)의 개념을 갖고 있다. 원전의 안전운전을 보수적으로 확보하기 위해 운전허용영역이 가장 작으며, 이 운전허용영역은 운전제한조건을 규정함으로써 설정된다. 운전제한조건 외에 안전계통제한설정치(Limiting Safety System Setting; LSSS)와 안전제한치(Safety Limits)가 있어 심층방어라는 안전 기본 원칙을 준수하고 있다. 그림 1에 표시된

안전제한치, 안전계통제한설정치 및 운전제한조건을 설명하면 다음과 같다.

- 안전제한치는 중요공정변수(important process variables)에 관한 제한치이다. 이 중요공정변수는 방사능 비제어 누출을 막기 위한 물리적 방벽의 건전성을 이상적으로 보호하는데 필요한 것이다. 만일 안전제한치를 위반한다면, 원자로를 정지시키고 규제기관에 통고해야한다. 그리고 규제기관의 운전재개 승인이 있는 후에 운전을 할 수 있다.
- 안전계통제한설정치는 중요 안전기능이 있는 공정 변수(process parameter)와 관련된 자동보호기기(automatic protective device)의 작동에 필요한 설정치 이다. 안전계통제한설정치가 설정되어 있기 때문에 안전제한치를 위반하기 전에 자동보호조치로 인해 비정상적 상황을 수정할 수 있다. 만일, 발전소 운전 중 요구시 필요한 자동 안전계통이 기능을 수행하지 못 하였다면, 원전사업자는 적절한 조치를 취한 후 규제기관에 통고하여야 한다.
- 운전제한조건은 발전소 안전 운전 필요 설비의 가장 낮은 수준의 기능적 성능(lowest functional capability) 또는 가장 낮은 행위 수준에 해당하는 것이다. 운전제한조건을 만족하지 못했을 때, 원전 사업자는 기술지침서에 허용된 교정적인 조치(불만족시 조치)를 수행하고 규제기관에 통고하여야 한다.

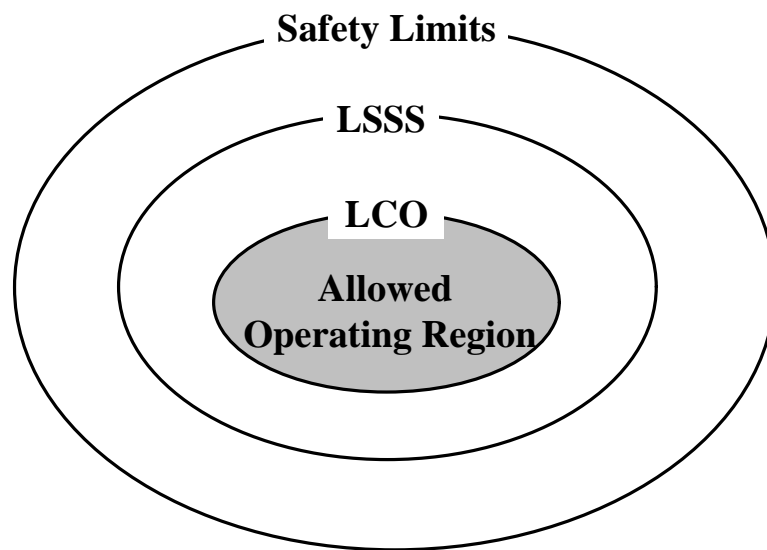


그림 1. 원자력 발전소 안전운전 체계 개념도

앞에서 설명한 바와 같이 운전제한조건은 운전측면에서 가장 낮은 수준의 안전 방벽이며 동시에 원전의 이상 징후 발생을 처음 감지할 수 있는 도구이다. 따라서, 이 운전제한조건이 잘 유지되고 준수되어야만 원전의 안전과 원활한 운전을 보장할 수 있다. 운전제한조건을 위반했을 경우, 아무런 조치를 취하지 않더라도 안전계통제한설정치와 안전제한치에 의해서 자동적으로 발전소가

정지하여 위험한 상태에 도달하는 것을 허용하지는 않는다. 그러나, 안전계통제한설정치와 안전제한치에 도달하기 전에 적절한 조치를 취하여 다시 운전제한조건을 만족하도록 하는 것이 경제적 측면이나 안전성 측면에서 가장 바람직하다. 현재, 대부분의 발전소 운영기술지침서에서는 이러한 적절한 조치가 서술되어 시행되고 있다.

만일, 이 적절한 조치를 시행하더라도 재차 운전제한조건을 만족하지 못할 때는, 안전계통제한 설정치에 도달하도록 기다리는 것이 아니라, 해당 운전제한조건이 적용되지 않는 상태에 진입한다. 이와 같은 행위는 해당 운전제한조건이 적용되어야 하는 상태를 벗어나기 위한 조치인데, 해당 운전제한조건의 준수 의무를 면함으로써 발전소 안전을 효과적으로 도모하고자 하는 의도이다. 이때 필요한 것으로, 해당 운전제한조건에 적용되는 발전소 운전상태를 설정하는 기본 배경이 되는 것이 바로 ‘운전모드’이다.

### 1.2 운전모드의 정의

운전모드란 발전소의 운전상태를 말하는 것으로, 발전소 상태를 표시할 수 있는 여러 인자들(열출력, 증배계수, 원자로냉각재 압력, 원자로냉각재온도 등등)을 타당하게 조합하여 정지에서 출력운전까지의 발전소 상태를 몇 단계로 나눈 것이다.

운전모드는 발전소의 여러 인자들을 조합하여 설정되었기 때문에 발전소 노형에 따라 매우 다양하지만, 운전모드가 운영기술지침서 내에서 갖는 역할과 성격은 거의 동일하다. 일례로 WH형 원전(NUREG-1431)에 명시된 운전모드는 다음과 같다. 표 1에 보이는 바와 같이, WH형 표준운영기술지침서(NUREG-1431)에서는, 발전소 상태 표시 인자를 반응도 조건( $K_{eff}$ ), 정격열출력, 원자로냉각재평균온도 등 3가지로 규정하였고, 핵연료 재장전에서 출력운전까지 6단계의 운전모드를 사용하여 발전소 상태를 나타내고 있다.

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

(1) 붕괴열은 제외한다.

(2) 모든 원자로용기 헤드 잠금볼트는 완전하게 조여져 있다.

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

표 1. Westinghouse 형 가압경수로의 표준 운전모드

### 1.3 운전모드의 기능

표 1에서 정의된 운전모드는 WH형 표준운영기술지침서에 기술된 100여개의 운전제한조건에서 직접 사용되고 있다. 이해를 돕기 위해, 운전제한조건 3.4.1(핵비등이탈 제한을 위한 온도, 압력 및 유량) 중에서 가압기 압력 변수만을 선택하여 그림 2와 같이 작성하였다. 참고로, 그림 2의 형식은 미국 NRC가 발간한 NUREG1430~1434에서 사용하는 기술지침서 형태로서 가장 인간공학적이고 운전의 효율성을 극대화 할 수 있다고 알려져 있다. 국내 경수로 원전에서 이미 이러한 형태를 적용하였으며, 국내 중수로 원전 또한 이러한 형식의 중수로형 표준운영기술지침서를 개발하는 과정 중에 있다.

그림 2의 형태를 간단히 살펴보면, ‘운전제한조건(Limiting Condition for Operation’, ‘적용(Applicability)’, ‘불만족시 조치(Actions)’, 그리고 ‘점검요구사항(Surveillance Requirements)’ 등으로 4가지 항목이 있다.

‘운전제한조건’에는 안전해석을 근거로 하여 결정된 발전소 안전 운전에 필요한 사항들이 규정되어 있다. 그림 2의 운전제한조건 3.4.1은 핵비등이탈(DNB)을 방지하기 위한 매개변수 중의 하나로서 가압기 압력을 선정하였다. 즉, 가압기의 압력은 2200 psig 이상이 되어야 한다. 그러나, 이 운전제한조건을 항상 준수해야 되는 것은 아니다. ‘적용’ 항목에 의해 준수해야 할 운전제한조건이 제한을 받는다. 그림 2의 경우에는, 발전소 상태가 운전모드 1에 해당될 때만 운전제한조건 3.4.1을 준수해야 하며, 적용의 ‘주’에 서술된 사항에 따라 운전제한조건 3.4.1 준수를 유예할 수 있다. 운전모드 1에 대한 구체적인 사항은 표 1에 명시되어 있으며, 운영기술지침서 앞부분 정의편에 기술되어 있다.

불가피한 상황으로 인해 운전제한조건 3.4.1을 준수하지 못 했을 때는 ‘불만족시 조치’ 항목을 시행해야 한다. 즉, 가압기 압력이 2200 psig 미만이 되었을 때는 불만족 상태 1로 진입하여 제한시간 2시간 이내에 가압기 압력을 2200 psig 이상으로 복구해야 한다. 만일, 이를 수행하지 못했다면, 불만족상태 2로 진입하여 6시간 이내에 운전모드 2로 진입하여야 한다. 이러한 조치는 운전모드 1을 벗어나는 행위로서 운전제한조건 3.4.1의 적용을 받지 않겠다는 의도이다. 다시 말해서, 해당 운전제한조건을 위반했을 때, 취해지는 마지막 수단은 해당 운전제한조건이 적용되지 않는 발전소 상태로 진입(운전모드 변경)하여 해당 운전제한조건을 전혀 적용 받지 않는 것이다. 운전모드 변경은 운영기술지침서 내에서 취해지는 최종적인 안전복구 수단이라 할 수 있다.

운전제한조건이 적절하게 준수되고 있는지를 확인하는 수단은 ‘점검요구사항’을 시행하는 것이다. 그림 2의 경우에 점검요구사항 3.4.1.1을 수행함으로써 운전제한조건 3.4.1이 만족되고 있는지를 판단할 수 있다. 즉, 점검주기 12시간마다 가압기 압력을 확인하여 2200 psig 이상이면 운전제한조건 3.4.1을 만족하는 것이고, 2200 psig 미만이면 즉시 불만족 상태 1로 진입하여 제한시간 이내에 조치요구사항 1.1을 수행하여야 한다. 여기에서 간과하지 말아야 할 것으로, 점검요구사항도 ‘적용’ 항목, 즉, ‘운전모드’에 의해 제한을 받는다는 점이다. 점검요구사항 3.4.1.1의 최초 수행시기는 운전모드 1로 진입하기 바로 직전이다. 점검요구사항 3.4.1.1을 수행하여 운전제한조건 3.4.1이 만족되는지를 확인한 이후에 운전모드 1로 진입해야 한다. 이것은 ‘운전제한조건 위반시, 적용에 있을 수는 없다. 단, 불만족시 조치 또는 별도 예외사항이 기술된 사항은 제외한다.’는 ‘운전제한조건 3.0.4’ 규정을 따른 것이다. 적용모드 진입하기 전에 점검요구사항을 최초 수행하여 운전제한조건이 만족되는 것을 확인한 후, 해당 적용모드에 진입한다. 그리고, 점검주기에 따라 점검내용

을 수행하여 운전제한조건이 만족되는 지를 지속적으로 확인하는 것이다.

### 3.4.1 핵비등이탈 제한을 위한 온도, 압력 및 유량

**운전제한조건 3.4.1** 가압기압력은 **2200 psig 이상**이어야 한다.

**적용**                      **운전모드 1**

**주**

가압기 압력제한은 아래 운전상태에서 적용하지 않는다.

1. 연속적인 원자로열출력 변화율 > 5% 정격열출력/분 ; 또는
2. 순간적인 원자로열출력 변화 > 10% 정격열출력

#### 불만족시 조치

불만족상태	조치요구사항	제한시간
1. 가압기압력이 <b>2200psig 미만</b> 일 때	<b>1.1</b> 가압기압력을 <b>2200psig 이상</b> 으로 복구한다.	2시간
2. 불만족상태 1의 조치요구사항과 제한시간을 불만족할 때	<b>2.1</b> <b>운전모드 2</b> 로 간다	6시간

#### 점검요구사항

점검내용	점검주기
<b>점검요구사항 3.4.1.1</b> 가압기압력이 <b>2200 psig 이상</b> 인지 확인한다.	12시간

그림 2. WH형 표준운영기술지침서 운전제한조건 3.4.1 (서술의 용이성을 위해 LCO 3.4.1 중 가압기 압력 제한에 관한 사항을 발췌하여 작성한 것임.)

## 2. 중수로 원전의 운전모드

### 2.1 캐나다 현황

가압중수로의 기술 보유국인 캐나다의 원전 규제 체계가 미국의 규제체계와 상이함으로 인해, 운전모드가 명확하게 규정되어 있지 않을 뿐만이 아니라 운영기술지침서 자체가 존재하지 않는다. 다만, OP&P (Operating Policies and Principles)라는 운전 지침을 개략적으로 제시한 문서만 존재한다. 이 문서는 규제기관의 승인이 필요한 법적 문서로서 캐나다의 AECB(Atomic Energy Control Board; 현재는 CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission)로 명칭 변경)의 인허가를 받아 원전 운전에 필요한 요건을 제공하고 있다. 이 문서에 대한 개정이 요구되는 경우, 개정 내용에 대해 규제기관의 승인을 받아서 사용하도록 되어 있다. 규제기관의 인허가를 받는다는 관점에서는 경수로에서 사용하는 운영기술지침서와 같은 성격을 갖지만, 내용 면에서는 OP&P가 운영기술지침서에 비해 상당히 부실한 것은 사실이다.

### 2.2 국외 가압중수로 원전의 운전모드 선정기준

가압중수로에 사용되는 운전모드 선정기준을 파악하기 위해 캐나다 여러 원전의 OP&P 및 SOE와 중국의 진산 원전의 운영기술지침서 등을 조사 및 분석을 하였다. 각 원전별 운전모드와 관련된 사항을 다음과 같이 간략하게 정리하였다.

- Pickering OP&P의 운전모드 : 명확하게 정의된 운전모드 없음
- Pickering OSR의 운전모드 : 명확하게 정의된 운전모드 없음
- Point Lepreau OP&P의 운전모드 : 명확하게 정의된 운전모드 없음
- Gentilly 2 OP&P의 운전모드 : 발전소 상태 표시 인자는 4개(출력, 반응도, 고온/가압, 저온/감압)를 사용하여 10종류의 운전모드를 정의함. 부연설명(commentary)을 사용하여 각 운전모드에서 취해야 할 사항들을 서술함.
- Bruce OP&P의 운전모드 : 명확하게 정의된 운전모드 없음
- Bruce OSR의 운전모드 : NUREG-1431의 운전모드 체계를 준수하여 발전소 상태표시인자 4개를 사용하여 4종류의 운전모드를 정의함.
- 중국 진산 원전의 운전모드 : NUREG-1431의 운전모드 체계를 따랐으며, 월성 2,3,4 호기의 운전모드를 모방하여 발전소 상태 표시 인자 4개(노심출력, 출구모관온도, 출구모관압력, 반응도)를 사용하여 5종류의 운전모드를 정의함.

원자로형이 가압중수로로 같고 설계회사도 AECL로 동일하지만, 각 원전에 사용되고 있는 운전모드의 형태는 매우 다양하다. 또한, Pickering, Point Lepreau, Bruce 원전 등의 OP&P에는 운전모드 자체가 존재하지 않는다. 이렇게 중수로 원전의 운전모드에는 통일된 형태가 존재하지 않고 각 원전이 운전되는 여건에 따라 다양하게 적용되고 있다. 그 이유는 중수로 기술보유국인 캐나다의 규제문화에서 기인한 것으로 보인다.

캐나다에는 체계적이고 문서화된 규제 지침이 미국에 비해 상당히 부족하여, 사업자와 규제기관의 쟁점이 되는 사항에 대해서는 상호 협조 및 담당자간의 대화 등을 통해 해결하며 기존의 관

례에 따라 규제행위를 한다. 반면에 미국의 규제문화는 관례에 따라 규제행위를 하기보다는 방대하고 체계적이고 문서화된 규정 및 법률에 근거하여 규제 행위를 한다. 이러한 이유로 인해 미국에서는 원자로형 별로 설정된 표준 운전모드가 존재하여, 미국 내 전 원전에 적용하고 있어, 가압경수로 운영기술지침서 내에는 명확한 운전모드가 규정되어 있다. 그러나, 가압중수로의 경우에는 기술보유국의 자유로운 규제문화로 인해, 각 원전의 형편에 맞게 운전모드를 선정하거나 혹은 운전모드 개념 자체를 적용하고 있지 않는다.

따라서, 가압중수로의 운전모드를 선정하는 통일된 기준은 존재하지 않으며, 일부 중수로 원전에서 적용하고 있는 운전모드의 개념은 미국의 운영기술지침서의 체계를 모방하였고, 각 원전의 현실에 맞는 발전소 상황을 고려하여 적절하게 운전모드를 설정한 것이다.

### 2.3 월성 2,3,4호기 운영기술지침서의 운전모드

국내 최초의 중수로 원전인 월성 1호기에는 월성 2, 3, 4호기와는 다르게 캐나다 규제 기관이 승인한 문서를 근거로 하여 작성된 OP&P를 인허가 문서로 사용하고 있다. 월성 1호기용 OP&P에는 운전모드에 대해 별도로 정의되어있지 않고, 안전 및 안전관련 계통들의 이용불능 또는 결함 발생시 필요한 조치사항들이 운전모드의 구분 없이 사안별로 기술되어 있다. 그러나, 월성 2호기 건설 이후부터는 가압경수로와 동일한 규제체계를 적용하기 위해, 미국의 NUREG-0452의 형식을 차용하여 세계 최초로 가압중수로형 운영기술지침서를 개발하였고, 현재, 월성 2,3,4호기에 적용하고 있다.

1996년 월성 2호기 운영기술지침서를 규제기관으로부터 최초 승인 받은 후, 수 차례의 개정을 거듭한 끝에 월성 2, 3, 4 호기에 차례로 적용하여 현재의 운전모드가 정착되었다. 월성 2, 3, 4호기의 운영기술지침서는 가압경수로의 운영기술지침서(NUREG-0452)를 근거로 하여 작성되었기 때문에 명확하게 정의된 운전모드가 존재한다. 본 연구에서 사용한 월성 2, 3, 4 호기 운영기술지침서의 운전모드는 2001년 9월에 과기부가 승인하여 현재 원전 현장에서 직접 사용 중인 것으로 다음 표 2와 같다.

발전소 상태를 표시하는 인자는 모두 3개로 원자로 출력(%FP), 냉각재출구모관온도(°C), 반응도 조건(Keff) 등이며, 발전소 운전 상태를 보증정지에서 출력운전까지 모두 5개로 나누어 표시했다. 또한, 각주를 사용하여 원자로 출력에는 붕괴열을 제외한 출력 운전시 발생하는 열만이 포함되며, 반응도 조건을 확인하기 위해 12시간마다 점검하는 요건이 추가되어 있다.

월성 2, 3, 4 호기에서 현재 사용중인 운전모드는 기본적으로 NUREG-0452에서 사용한 운전모드에 근거를 두고 있어, 운전모드가 갖는 개념과 기능 측면에서 국내 가압경수로의 운전모드와 동일하다. 그러나, 가압중수호가 갖는 노심 특성 및 계통 구성상의 차이점으로 인해, 구체적인 내용 면에서는 상당한 차이가 있다. 또한, 가압중수로의 주요 특성을 충분히 고려하지 않고 무리하게 운전모드를 선정하여 수 차례 변경하는 과정을 겪었다. 그 이후, 기술적인 많은 개선을 통해 현재의 운전모드가 정착되었다.

가압경수로의 운전모드와 마찬가지로, 운전모드를 선정하는데 필요한 별도의 선정기준은 없다. 표 2에 사용된 월성 2, 3, 4호기 운전모드의 세부적인 배경은 다음 절에서 표준 운전모드를 제시하면서 기술하기로 한다.



운전모드	원자로 출력*	냉각재출구모관 온도(℃)	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**

\* 붕괴열은 제외한다.

\*\* 최소한 12시간 마다 노심내 반응도 기구들(조절봉, 독물질 등)의 반응도 합으로 미임계 상태를 확인한다.

표 2. 월성 2, 3, 4호기 운영기술지침서의 운전모드

### 3. 중수로형 표준 운전모드 선정 및 확정

#### 3.1 중수로형 표준 운전모드 설정 원칙 및 방법

운전모드는 기본적으로 발전소가 운전되는 상태를 나타내는 것이므로 발전소 운전에 직접 사용되는 기동 및 정지 절차에 관한 사항이 반영되어야 한다. 그리고, 신규 작성되는 표준 운전모드에는 월성 2, 3, 4 호기의 기존 운전모드를 고려한 사항이 적극 반영되어야 한다. 왜냐하면, 월성 2, 3, 4 호기의 운전모드는 1996년 개발 이후 몇 차례의 개선을 통해 많은 경험과 기술이 축적되어 현재 큰 문제점 없이 적용되고 있다. 또한, 월성 원전 운전원들에게 상당히 익숙해 있을 뿐만 아니라 각종 지침서와 절차서 등에 광범위하게 적용되고 있다. 만일, 본 연구에서 작성되는 표준 운전모드가 이전의 월성 2, 3, 4호기 운전모드를 전혀 고려하지 않은 채 개발되어 월성 원전에 적용한다면, 운전원들에게 상당한 혼란을 주게 되어 오히려 안전성을 저해할 우려가 있다. 따라서, 표준 운전모드를 설정하기 위해 다음과 같은 원칙을 수립하였다.

#### · 표준 운전모드 설정 원칙

- 설계 및 운전 지침에 따른 중수로 원전의 기동 및 정지 절차와 일치하도록 운전모드 설정.
- 신규 운전모드 적용에 따른 혼란을 줄이기 위해, 기존 월성 2, 3, 4 호기 운영기술지침서의 운전모드 선정 배경을 조사하여 타당한 사항은 적극 반영.

위와 같은 원칙 하에 다음과 같은 연구 방법 및 과정을 통해 표준 운전모드를 설정하였다.

첫째, 국·내외 중수로 및 경수로에 적용되는 운전모드의 기술 검토 및 분석을 통해 운전모드의 정의를 수립하고, 운전모드가 운영기술지침서 내에서 사용되는 실례를 확인하여 운전모드의

기능 및 역할을 파악하였다. 둘째, 도출된 운전모드의 이론적 개념을 숙지한 후에, 중수로 원전의 설계 특성, 계통 및 운전 절차 등을 파악하기 위해, 월성 2, 3, 4호기의 설계자료(Design Manual), 운전자료(Operation Manual) 및 최종안전성분석보고서에 기술된 세부 사항들을 검토하였다. 세 번째로, 검토 완료한 사항과 현재 사용하고 있는 월성 2, 3, 4호기의 운전모드가 기술적으로 일치하는 여부를 조사하여 타당한 사항은 반영하고 오류가 있는 사항은 개선하여 중수로용 표준 운전모드를 선정하였다. 마지막으로, 선정된 표준 운전모드의 적용성과 적합성을 검토하기 위해, 월성 원전 현장 연구인력과 캐나다 GNEST사에 기술 검토 및 자문 수행하여 그 결과를 반영하여 중수로형 표준 운전모드를 최종 확정하였다.

### 3.2 중수로형 표준 운전모드 설정

3.1절 ‘중수로형 표준 운전모드 설정 원칙 및 방법’에서 언급한 연구 과정을 통해 설정된 중수로형 표준 운전모드는 표 3과 같다.

운전모드	반응도 조건 (Keff)	정격열출력 (%FP) <sup>(1)</sup>	냉각재출구모관 온도(℃)
1. 출력운전	≥0.99	> 2	> 260
2. 저출력 대기	≥0.99	≤ 2	> 100
3. 고온정지	< 0.99	해당 없음	> 100
4. 상온정지	< 0.99	해당 없음	≤100
5. 보증정지 <sup>(2)</sup>	해당 없음	해당 없음	해당 없음

(1) 붕괴열은 제외한다.

(2) 감속재 정화 격리밸브를 격리하고 자물쇠로 잠근다.

표 3. 중수로형 표준 운전모드

발전소 상태 표시 인자는 ‘반응도 조건’, ‘정격열출력’, ‘냉각재출구모관온도’ 등 총 3개이며, 운전모드 종류는 5가지로 ‘출력운전’, ‘저출력대기’, ‘고온정지’, ‘상온정지’, ‘보증정지’ 등이다. 이러한 표준 운전모드의 체계는 기본적으로 월성 2, 3, 4 호기 운전모드의 체계와 동일하나, 운전모드의 설정값 측면에서는 표준 운전모드가 월성 2, 3, 4 호기 운전모드에 비해 상당히 구체적이고 명확하다. 중수로형 표준 운전모드 설정의 기술적 근거 및 배경은 다음과 같다.

### 3.2.1 운전모드 1

운전모드 1은 출력운전 상태로 원자력 발전소의 궁극적인 목적인 전력 생산을 위한 발전소 상태를 나타낸다.

노심반응도를 기준으로 볼 때, 임계 상태이면 핵분열에 의해 노심에서 지속적으로 에너지가 생성된다. 따라서, 1차 계통에서 발생하는 열을 2차 계통을 통해 계속적으로 제거해야만 노심 건전성을 유지할 수 있다. 반면에, 노심이 미임계로 유지될 경우에는 붕괴열이 발생되기는 하지만 지속적인 에너지 생성은 일어나지 않으며, 1차계통의 노심 및 냉각재에 저장된 열에너지만 제거하면 노심 건전성이 보장된다. 따라서, 노심반응도 0.99를 기준으로 운전모드 1, 2(Keff 0.99 이상)와 운전모드 3, 4(Keff 0.99 미만)를 구분하였다. 반응도 1.0을 기준으로 하여 기술하지 않고, 0.99의 수치를 사용한 이유는 안전여유도를 고려하였으며, 약간의 반응도 투입으로 임계도달이 충분히 가능하며, 출력 상승 및 지속적인 출력 운전이 가능하기 때문이다.

원래, 가압중수로에는 반응도를 감시하고 표시할 수 있는 별도의 기기가 없다. 그러나, 국내 규제기관에서는 반응도를 구체적인 수치인 Keff(정량적인 값)로 나타내도록 권고하여 이를 수행하기 위해 여러 가지 조치가 시행되고 있다. 현재, Keff를 구체적으로 계산하기 위한 프로그램 개발에 관한 연구과제가 시행되고 있으며, 붕소 농도, 가돌리늄 농도, 경수영역제어기의 수위, 조절봉 위치, 흡수봉위치, 제논 농도, 사마리움 농도 등을 종합적으로 고려하고 있다.

정격열출력 2%를 기준으로 하여 운전모드 1과 2를 구분한다. 2%라는 구체적 수치는 1개 이상의 공정변수가 비정상 상태로 확인될 때, 열출력을 자동제어 방식에 따라 출력을 감소하는 연속 출력감발(Set back)의 최종 목표값이며, 원자로 임계후 본격적으로 출력 운전에 돌입하기 위한 시작 시점이다. 운전모드 1(정격열출력의 2%초과)의 상태에서는 핵연료 다발이 가지고 있는 에너지의 양이 다른 운전모드에 비해 상대적으로 크므로 노심의 출력분포 제한치를 적용해야 한다. 따라서, 노심출력분포에 관한 운전제한조건들(핵연료 채널 출력, 핵연료 다발 출력 등)은 운전모드 1에서만 적용된다.

운전모드 1과 2를 구분하는 또 하나의 설정값으로 냉각재 출구 모관 온도가 있다. 냉각재 출구 모관 온도 260℃는 원자로 정지후 냉각재 계통의 온도이며, 정상적인 방식으로 원자로를 냉각할 경우, 냉각재 온도 260℃에서부터 터빈 우회 밸브, 즉, 복수기 증기 방출 밸브를 통해 증기를 방출함으로써 원자로를 냉각할 수 있다. 이 방법을 사용하여 냉각함으로써 압력관 파단의 가능성을 제한할 뿐만 아니라 수소 취화 균열의 위험을 조절할 수 있다.

### 3.2.2 운전모드 2

운전모드 2는 냉각재 계통이 고온 및 고압 상태이지만 출력이 2% 미만으로 저출력 대기 상태이며, 운전모드 1에서 준수해야할 운전제한조건을 위반했을 때 취해지는 발전소 보호조치로서 최종적으로 진입해야할 상태이다.

반응도 조건을 기준으로 볼 때, 운전모드 2는 운전모드 1과 동일하다. 이는 경수로 원전의 운전모드 2(기동)와 유사한 것으로 약간의 반응도 투입으로 임계 운전에도 도달할 수 있으며, 안전여유도를 고려하여 0.99라는 수치를 사용하였다. 연속출력감발(Set back)의 최종 목표값인 정격열출력 2%를 기준으로 운전모드 1과 운전모드 2를 구분하며, 열출력이 2%이하 일 때 운전모드 2에 해당한다.

운전모드 2를 구분하는 또 하나의 인자로서 냉각재 출구모관 온도 100℃가 있다. 100℃는 상온

과 고온을 구분하는 기준 온도이며, 비상노심냉각계통이 작동되는 설정값이다. 즉, 100℃ 이상에서는 비상노심냉각계통이 항상 운전가능한 상태를 유지해야하며, 100℃ 미만에서는 비상노심냉각계통이 차단되는 것을 허용한다. 이와 같은 냉각 방식은 중수로 원전의 표준운전절차(Standard Operating Procedure)에 해당하며, 압력관 파단의 가능성을 낮추고 수소 취화 균열의 위험성을 감소시키기 위한 방법이다.

운전모드 1과 2에서는 원자로 출구모관 온도가 100℃ 이상이면 원자로 임계를 허용한 상태로 운전모드 3에 비해 상당히 고압이다. 고압 상태에서 냉각재 상실사고가 발생하여 원자로냉각재계통의 압력이 저하되면, 건전한 회로의 원자로 냉각재가 파손된 회로로 이동하여 사고를 확대시킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 원자로냉각재 회로를 차단하는 가압기 격리 밸브, 압력 및 수위 제어계통의 중수 증수 밸브 등의 유로격리밸브에 관한 운전가능성 확보는 운전모드 1과 운전모드 2에서 요구된다.

### 3.2.3 운전모드 3

운전모드 3은 고온정지 상태로서 출구모관 온도가 100℃를 초과한 고온이며, Keff는 0.99미만으로 원자로 정지상태이다. 또한, 열출력이 발생하는 운전모드 1, 2에서 준수해야할 운전제한조건을 위반했을 때 취해지는 발전소 보호조치로서 진입해야하는 발전소 상태가 운전모드 3에 해당된다.

운전모드 3과 4는 반응도 조건이 0.99 미만으로 명확한 미임계 상태로써, 원자로가 정지된 상태이다. Keff가 0.99 미만(원자로 정지)이므로, 붕괴열이 있을 수는 있어도, 원자로가 임계에 도달하여 발생하는 열은 존재하지 않는다. 표 11의 각주(1)에 따라 정격열출력에는 붕괴열이 포함되지 않는다고 정의하였으므로, 원자로 미임계(운전모드 3, 4, 5) 상태에서 열출력은 전혀 발생하지 않는다. 이것은 원자로 미임계 상태에서는 정격열출력에 관한 사항을 전혀 고려할 필요가 없다는 것을 의미하므로 '해당없음'으로 기술하는 것이 타당하다. 그리고, 운전모드 3, 4, 5에서는 원자로 정지 후 발생하는 붕괴열과, 노심 및 냉각재에 저장된 열을 제거한다면 발전소의 안전을 확보할 수 있다. 따라서, 운전모드 3, 4, 5에서는 발생하는 열이 운전모드 1, 2에 비해 적기 때문에 전체 열제거 계통 중 일부 유로의 운전 정지가 허용된다. 그러나, 대형파단 냉각재상실사고에 대한 비상노심냉각계통의 운전가능성은 보수적인 관점에서, 운전모드 2와 냉각재 출구모관 온도가 동일한 운전모드 3에서도 확보되어야한다.

### 3.2.4 운전모드 4

운전모드 4는 상온정지 상태로서 출구모관 온도가 100℃ 이하로 상온이며, Keff는 0.99미만으로 원자로 정지상태이다. 또한, 원자로 정지 및 냉각 후 취해지는 발전소 보호조치로서 최종적으로 진입해야하는 발전소 상태이다.

운전모드 4는 운전모드 3과 동일하게 Keff가 0.99 미만이므로 원자로로는 완전히 정지되어 임계 운전시 발생하는 열은 존재하지 않으며, 붕괴열과 냉각재에 저장된 열만 존재한다. 또한, 출구모관온도가 100℃ 이하로 운전모드 3의 상태보다 원자로 냉각재 온도가 훨씬 낮은 상태이다. 이로 인해 비상노심냉각계통의 운전가능성을 요구하지 않지만, 정지냉각계통을 사용하여 냉각을 하며, 비상노심냉각계통을 제외한 모든 특수 안전계통의 운전가능성을 요구한다.

### 3.2.5 운전모드 5

운전모드 5는 원자로가 완전히 정지되어 있는 상태로서 별도의 조치가 없는 한, 원자로를 지속적으로 미임계 상태로 유지할 수 있다. 보증정지상태에 진입하여 원자로가 완전히 그리고 지속적으로 정지되어 있다는 것을 확인한 후, 원전의 유지 보수를 위해 예방정비를 실시한다. 보증정지상태는 중수로 원전이 갖고 있는 주요 특성 중의 하나이다.

운전모드 5에서 반응도 조건(Keff)을 ‘해당없음’으로 기술한 이유는 다음과 같다. 운전제한조건 3.4.7 ‘원자로냉각재계통 - 운전모드 5’에서 붕소농도 또는 등가의 가돌리늄 농도에 관한 제한치가 존재하여 독물질 주입에 관한 사항을 만족하면 충분히 미임계 상태에 도달하는 것을 보장함으로써 운전모드 정의 표에 구체적으로 기술할 필요가 없어 ‘해당없음’으로 기술하였다. 이러한 사항은 WH형 표준 운영기술지침서의 운전모드 6(핵연료 재장전)의 반응도 조건에 ‘해당없음’으로 기술한 것과 유사한 것이다. WH형 표준 운영기술지침서 운전제한조건 3.9.1에서 제시한 붕소농도를 만족하면 Keff가 적어도 0.95 이하가 됨으로 별도의 수치를 기입하지 않고 ‘해당없음’으로 기술한 것이다.

운전모드 5의 정격열출력 항에 ‘해당없음’이라고 기술한 이유는 앞 절 ‘3.2.3 운전모드 3’에서 기술한 바와 같이 원자로가 완전히 정지된 상태(미임계 상태)에서는 출력운전시 발생하는 현열이 존재하지 않아, 정격열출력에 관한 사항을 전혀 고려할 필요가 없다는 것을 의미하므로 ‘해당없음’으로 기술하였다.

운전모드 5의 상태에서 준수해야하는 운전제한조건 3.4.7 ‘원자로냉각재계통 유로-운전모드 5’에서는 1개 이상의 정지냉각유로가 운전 중이어야 함을 요구하고 있다. 이러한 사항을 만족하면 운전모드 5의 상태에서는 적어도 원자로 냉각재 온도가 54°C미만이 됨으로 별도로 운전모드 정의 표에 구체적으로 기술할 필요는 없다. 따라서, 운전모드 5의 냉각재출구모관온도에 관한 항목에도 ‘해당없음’이라고 기술하였다.

결국, 운전모드 5에서는 반응도 조건, 정격열출력, 원자로냉각재출구모관온도 등의 발전소 상태 표시인자 모두가 ‘해당없음’으로 기술되어 운전모드 5에 대한 발전소 상태를 운전모드를 정의한 별도 표에서 확인할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 운전모드 5의 상태를 표시할 수 있는 사항을 별도의 ‘주’ 로 나타내었다. 즉, 운전모드 5에서 요구되는 감속재 정화 계통 차단을 보장하기 위해, “감속재 정화 격리밸브를 격리하고 자물쇠로 잠근다.” 는 사항을 “각주 (2)” 로 명시하여 운전모드 5의 상태를 정의하였다. 이러한 사항은 WH형 표준 운영기술지침서의 운전모드 6(핵연료 재장전)의 발전소 상태 인자에 모두 해당사항이 없음으로 인해 각주 (3)을 사용하여 운전모드 6을 정의한 사항과 유사한 것이다.

중수로 원전의 보증정지 상태에서는 독물질이 과다하게 주입되어 있고 모든 정화계통이 차단되어 있으며, 외부전력수전상태에서 정지냉각계통을 이용해 냉각하고 있다. 다른 운전모드에 비해 안전한 상태이므로 2개의 정지계통 중 1개만 운전가능성을 확보하면 된다.

### III. 결 론

본 연구는 중수로 원전 운영기술지침서 표준화 연구의 일환으로 중수로용 표준 운전모드를 개발하기 위해 수행되었다. 먼저, 중수로 원전에 적용되는 운전모드를 개발하는 것이 본 연구의 목

적이므로, 국·내외의 중수로 원전에 사용되는 운전모드는 물론, 운전모드와 유사하게 사용되는 사항을 조사 및 분석하였다. 조사 후 분석된 자료를 바탕으로 국내 중수로 표준운영기술지침서에 적용할 수 있는 최적의 운전모드를 개발하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 다양하게 설정되어 있는 운전모드를 분석하여 운전모드의 정의와 기능을 구체적으로 명시하였다. 운전모드란 발전소의 상태를 말하는 것으로 발전소 상태를 표시할 수 있는 여러 인자들을 타당하게 조합하여 정지에서 출력운전까지의 발전소 상태를 몇 단계로 나눈 것이다.
- 국내외 가압중수로 원전에서 사용되는 운전모드 혹은 운전모드와 유사한 항목(Pickering OP&P의 7종)을 조사 및 분석하였고, 중수로 원전 기술보유국인 캐나다의 운전모드 선정기준을 조사하였다. 가압중수로에 적용되는 운전모드 선정기준은 없으며, 중수로 일부 원전에서 적용하고 있는 운전모드는 미국 운영기술지침서의 운전모드와 각 발전소 상황을 반영하여 작성된 것이다.
- 가압중수로용 표준 운전모드를 개발하였다. 먼저, 표준 운전모드 설정원칙을 수립하고 그에 맞는 타당한 연구 방법 및 과정을 통해, 반응도 조건, 정격열출력, 냉각재출구모관온도를 조합하여 5단계의 운전모드를 선정 및 확정하였다.

본 연구에서 개발된 중수로용 표준 운전모드는 향후 개발 예정에 있는 중수로용 표준운영기술지침서의 기본 형태 및 배경을 구성하는데 사용됨은 물론 운전제한조건의 적정성을 판단하는데 기본이 되어, 과도하고 불필요한 요건을 삭제 및 완화하고 안전에 반드시 필요한 사항을 반영하는 데 많은 도움을 주리라고 예상된다.

## 참고문헌

1. EPRI NP-4498 Volume 1, "The Reactor Analysis Support Package", EPRI, 1986
2. NUREG-0452 Rev. 3, "Standard Technical Specifications for Westinghouse Pressurized Water Reactors", US NRC, 1980
3. ANS-58.4-1979, "American National Standard Criteria for Technical Specifications for Nuclear Power Stations", ANSI, 1979
4. 백원필, 장순홍 "원자력 안전" 청문각, 2001
5. EPRI NP-5475, "Identification and Clasification of Technical Specification Problems", EPRI, 1987
6. 한전기술-0005, "WH형 표준운영기술지침서", 한국전력공사, 2000
7. 한전기술-0005, "CE형 표준운영기술지침서", 한국전력공사, 2000
8. NUREG-1431, "Standard Technical Specifications Westinghouse Plants", US NRC, 1995
9. "월성원자력 2호기 운영기술지침서", 한국전력공사
10. "운전 및 시험 분석 평가기술 개발(I) - 국내원전 기술지침서 표준화 연구" 과학기술부 1995
- 11 "월성 2호기 최종안전성분석보고서", 한국전력공사