

원자로 중성자 검출시스템의 구동장치 개선적용

박두용*, 변승현
전력연구원, 전력연구원

Application and improvement of neutron detecting system for nuclear reactor

Doo-yong Park, Seung-hyun Byun
KEPRI, KEPRI

1. 서 론

원자로내의 중성자는 로내의 상부에서 하부까지 분포하는 데 검출방법에 따라 고정형과 이동형으로 구분한다. 고정형은 원자로 내에 측정할 수 있는 Hole 의 수만큼 측정장치가 필요하나, 이동형은 전체 Hole 수를 이동형 장치 수로 나눈 만큼의 검출기만 있으면 되므로 이동형이 경제적으로 매우 유리하다. 그러나 이동형은 이동장치의 신뢰성, 제어장치, 구동장치의 안정성이 충분히 확보되어야 사용할 수 있다. 노내 핵계측 계통(Digital Flux Mapping System)은 선택된 노심 위치에 대한 중성자 속 분포와 핵연료 다발 출구 온도 정보를 취득하도록 설계하였다. 취득된 정보를 사용하여 원자로 노심 설계 파라미터 확인이 가능하며 이 시스템은 단지 데이터를 취득하기 위하여 수단을 제공하며 발전소 제어는 하지 않는다. 이 시스템을 영광원자력에 적용하기 위하여 검출시스템의 하드웨어, 소프트웨어를 영광원자력의 특성에 맞게 새롭게 개선하여 제작하고 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 설비교체 배경

영광 2호기 노내 핵계측 계통은 미국 Westinghouse사로부터 발전소와 함께 공급된 이동식 검출 계통으로서, 1980년 중반 상업운전을 시작한 이후 장기간 운영됨에 따라 노후화 및 기능 저하로 검출기의 삽입 및 인출 작업이 원만치 못하여 잦은 고장이 발생되어 왔고, 예비품 단종으로 계통의 정비에 많은 어려움을 겪고 있어 설비 개선이 요구되었다.

2.2 중성자 검출기 구성

노내 핵계측 계통은 선택된 노심 위치에서 노심 냉각재 출구 온도를 측정하기 위한 Thermocouple과 원자로 연료 내부 중성자 속 분포를 측정하기 위한 Flux Thimble들로 구성된다. Thermocouple과 Flux Thimble에 대한 High Pressure Seal이 있다.

핵연료 집합체 출구 온도를 측정하기 위한 열전대가 핵연료 집합체 출구 측에 설치되어 있고, 중성자 속 분포를 측정하기 위해서 중성자 속 검출기(Neutron Flux Detector)가 드나들 수 있도록 설치된 Thimble를 통하여 검출기가 핵연료 다발 사이를 통과하면서 노내 핵분포를 측정한다.

2.3 중성자의 측정

측정된 정보는 원자로 노심 설계 파라미터와 계산된 Hot Channel Factor를 확인 가능하게 하며, 과거에 결정된 분석적인 노심 정보와 연계하여 노심 주기 동안의 특정 시간에 대한 Fission Power Distribution을 확인할 수 있게 한다. 또한, Fission Power Distribution과 Thermal, Hydraulic 정보는 최대 노심 능력을 결정하며, 노내 계측 정보는 Enthalpy Distribution을 계산하는데 사용된다.

노내 온도와 중성자 속 분포 데이터는 이전에 결정되어진 분석적 정보와 더불어 노심 수명 기간 중 어느 시점에서의 Fission Power Distribution을 결정하기 위하여 사용될 수 있다. 이 방법은 단지 계산 기법을 사용하는 것보다 더 정확하다. Fission Power Distribution이 한번 결정되면, 최대 출력이 최대 노심 능력을 결정하는 Thermal Power Distribution과 Thermal & Hydraulic Limitation에 의해 결정된다.

노내 핵계측 계통은 Coolant Enthalpy Distribution, Fuel Burnup Distribution을 계산하는데 사용되는 정보를 제공하며 Coolant Flow Distribution을 평가하는데 사용될 수 있다. 출력 분포의 Radial & Azimuthal Symmetry는 한 개 사분면의 검출기 및 열전대 정보를 나머지 사분면 데이터와 비교함으로써 평가한다.

2.3 이동형 검출기 및 심블

4개의 분열전리함(Fission Chamber)식 검출기(U-235가 90%이상 농축된 U308 사용)가 사용된다. 검출기는 직경이 약 4.75mm(0.187")이며 길

이는 약 56mm(2.2")이다. 검출기의 끝부분에 길이 약 54m의 Helical Wrapped Cable과 Inconel Sheathed Coaxial Cable이 용접되어 있다. Helical Wrapped Cable의 구동 피치는 약 2.54mm(0.1")이고, 사용된 검출기는 Framatome사 CFUF 43/PA54SC를 사용한다.

검출기 심블(Thimble)은 밀봉테이블부터 원자로 용기 속까지 연결되어 있다. 원자로 용기 끝으로 들어간 심블의 끝은 막혀 있으므로 내부는 보통 건조하며 원자로 냉각재 압력(설계 값 2,500 Psia)과 대기 압력 사이의 압력 경계 역할을 한다.

정상 운전 중, 심블은 원자로 내의 핵연료 다발 속에 고정되어 있으며 핵연료 교체나 보수를 위해서만 원자로 용기의 바닥까지 약 4m 인출된다. 심블과 원자로의 일부인 심블 안내관과의 기계적인 밀봉은 저압 혹은 고압밀봉을 사용한다.

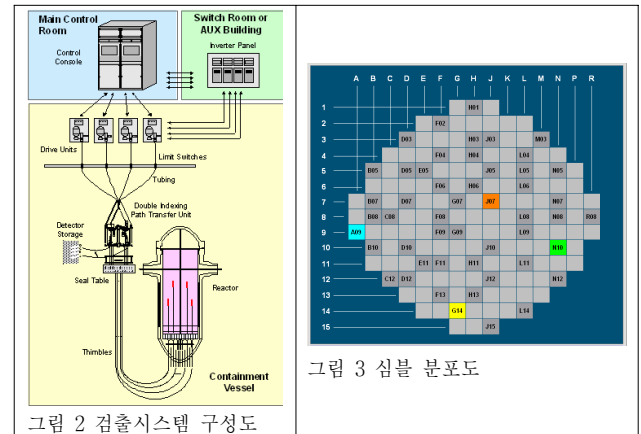


그림 3 심블 분포도

2.4 신형 검출기 구동설비의 설계

구동기는 1) 모터/기어와 토크 리미터, 2) 검출기의 위치를 검출하는 위치전송기, 3) 검출기를 삽입 또는 인출하는 구동 상자, 4) 검출기 케이블 저장 릴, 5) 모터 속도제어기 및 6) 기타 부속장치로 구성되며, 이들의 주요 제작사양을 다음과 같이 설정하였다.

2.4.1 모터/기어와 토크 리미터

모터와 기어는 헬리컬 기어와 함께 검출기를 구동하는 역할을 수행하며, 검출기 케이블에 과도한 힘이 가해지는 것을 방지하기 위하여 구동축에 토크 리미터가 접속되어 있다. 고리 3, 4호기 기존 구동기에 사용된 모터, 감속기와 토크 리미터의 사양은 다음과 같다.

- 1) 모터/기어 : 3상 4극 440V, 60Hz, 750W, 40:1 감속기어 채택
- 2) 정격토크 : 18.3 [Kgf · m] > 8.5729 [Kgf · m]
- 3) 정격회전수 : 고속 : 45 [rpm], 저속 : 4.7 [rpm]
- 4) 케이블 속도 : 고속 : 582.9 [mm/sec], 저속 : 60.96 [mm/sec]
- 5) 헬리컬기어 지름 : 247.4 [mm]
- 6) 토크리미터 : 3.927 [Kgf · m]
- 7) 최대 삽입력 : 31.75 [Kgf]

2.4.2 위치전송기

위치 전송기는 검출기의 위치를 측정하기 위한 목적으로 사용되며, 영광 2호기에서는 Resolver 형태의 것을 사용하고 있다. Resolver는 400 Hz ~ 10 KHz의 비교적 높은 주파수 영역에서 아날로그 방식의 신호를

제공하므로 격납용기에서 주제어실까지 신호를 연결하기 위해서는 Resolver 전용의 특수 케이블을 별도로 포설하여야 한다.

영광 2호기에서는 광학식 엔코더를 채용하여 설계 및 제작하였는데 광학식 엔코더는 헬리컬 기어의 축 끝단에 연결되어 헬리컬 기어가 1회 회전할 때 1000개의 펄스를 발생한다. 광학식 엔코더는 90도의 위상차를 갖는 A와 B의 펄스를 발생하여 속도와 회전방향에 대한 정보를 제공한다. 제어반의 PLC는 Counter 모듈을 통해 엔코더의 펄스를 카운트하고 이를 실제의 위치로 변환한 후 이를 컴퓨터 통신을 통해 운전원 콘솔의 컴퓨터로 전송하여 LCD 화면에 표시한다. 헬리컬 기어의 직경이 247.4mm 이므로 1회전 당 1000개의 펄스를 발생하는 엔코더의 해상도는 0.78mm가 된다. 엔코더의 펄스는 Low 일 때 0V 이고 High 일 때 24V 이다. PLC는 인출제한 스위치가 동작하는 순간 엔코더 카운트 값을 초기화하여 거리가 0mm가 되도록 초기화한다.

2.4.3 구동상자

구동 상자 내부에는 검출기 케이블을 걸쳐 원자로 내부로 삼입 또는 인출할 수 있도록 헬리컬 기어가 모터 측에 나란히 장착되어 있다. 검출기 케이블이 헬리컬 기어에 무리 없이 걸려질 수 있도록 여타 발전소에서 널리 사용하고 있는 가이드 롤러를 고리 1호기 때와 마찬가지로 동일하게 설계 및 제작하였다. 헬리컬 기어의 직경은 검출기 케이블 저장 릴의 직경 및 위치와 관련되므로 검출기 케이블의 휘어짐을 줄이는 방향으로 접근하여 P.C.D.를 247.4mm로 정하였다. 가이드 롤러는 정비의 편이성을 향상시키기 위해 구동 상자 덮개에 원터치 방식으로 탈착이 가능하도록 제작하였다.



그림 4 검출기 삼입-인출용 구동설비

2.4.4 검출기 케이블 저장 릴

검출기 케이블 저장 릴은 약 50m 정도의 검출기 케이블을 수용하고 일정한 힘으로 당기면서 감거나 풀어주는 역할을 담당한다. 기존의 제품들에는 기계식 스프링 모터를 사용하는 것이 대부분이고 울진1,2호기의 경우 DC 모터를 사용하고 있다. 스프링 모터는 판 스프링을 2중으로 감아 일정한 토크를 내도록 고안 되었으나, 설비가 노후화됨에 따라 고장이 자주 발생하고 있으며 스프링의 탄력 때문에 정비에도 많은 어려움이 있다. 또한 스프링 문치는 무게가 무거워서 관성이 크므로 급가속 시에 검출기 케이블을 강하게 당기는 현상이 있어 검출기 케이블을 손상시킬 우려가 있다.

영광 2호기에서는 40W의 AC 토크 모터를 채용하였다. 토크 모터는 구속토크가 큰 반면 회전속도가 증가함에 따라 토크가 감소하는 특징을 가지고 있어 릴에 케이블이 많이 감길수록 반경이 증가하여 회전속도가 감소하는 저장 릴의 현상을 보완하여 케이블에 일정한 장력을 가할 수 있다. 저장 릴에 채택된 토크 모터의 사양은 아래의 표와 같다.

구분	내용	비고
종류/용량	AC 토크 모터/40W	
주변 허용온도	-10℃ ~ +60℃	
기타특성	- 토크 세기 조절가능 - Cooling Fan 내장	토크조정용 변압기 장착

표 3 저장 릴에 사용된 AC 토크 모터의 사양

2.2.5 모터/감속기와 토크 리미터

구동기에는 3상 440V 1마력(0.75KW)의 유도 모터와 1/40의 감속기어가 설치되어 있으며 구동모터는 인버터에 의해 속도가 제어된다. 모터와 기어는 일체형으로 제작되어 있는 제품을 사용하여 설치 공간을 줄이고 백래쉬가 없는 벨로즈(Bellows)형의 커플링과 설정이 용이한 토크 리미터를 사용하였다. 감속기어의 윤활유는 보충하거나 교환할 필요가 없다. 기술사양서에는 사용시간이 10000시간이 초과될 때 윤활 그리스를 교환 또는 보충하여 주면 수명이 연장된다고 기술하고 있다.

토크 리미터는 구동모터에 의해서 구동되는 케이블과 검출기를 보호하기 위해 검출기에 무리한 힘이 가해지지 않도록 하기 위하여 헬리컬 기어와 감속기어 사이에 설치되어 있다. 심블에 이물질이 없는 좋은 상태에서는 75과운미 미만의 힘으로 케이블을 심블의 끝까지 밀어 넣을 수 있다. 토크-리미터의 동작점은 현장에서 조정할 수 있으나, Ball-Detent 타입의 토크 리미터는 슬립 크리치와 같이 마모되는 부분이 없으므로 현장에서 주기적으로 재조정할 필요는 없다.

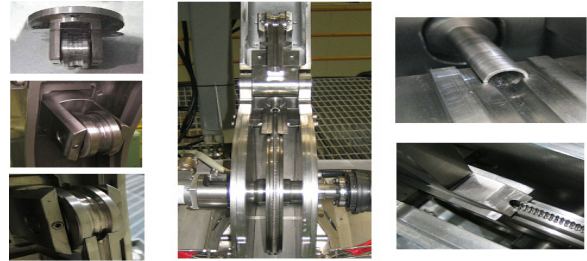


그림 5 a) 가이드 롤러 b) 헬리컬 기어모치 c) 검출기 안내관 구동상자 (내부)

2.4.5 수동조종기

검출기 케이블의 교체, 기타 구동기의 정비를 목적으로 사용할 수 있도록 구동모터를 제어할 수 있는 수동조종기가 설치되어 있다. 수동조종기는 검출기를 삼입하거나 인출할 수 있는 기능과 속도를 선택할 수 있는 기능이 마련되어 있다. 검출기 위치에 대한 정보를 제공하기 위해 인출 제한 스위치와 안전 제한 스위치의 상태를 보여주는 램프가 설치되어 있다. 정비가 끝나면 반드시 운전모드를 원격으로 전환하여야 주 제어실에서 운전이 가능하다.

2.4.6 제습용 가열기

각 구동기의 저장릴 아래에는 1개의 110VAC 200W의 가열기가 부착되어 있어 격납용기 내부가 다습한 경우 가열기를 켜서 구동 케이블의 부식을 방지한다. 가열기는 주제어실 제어반의 전원 스위치에 의해 동작되며 스위치를 켜면 4개의 구동기에 설치되어 있는 가열기가 모두 동작한다. 구동기내부에 과열방지를 위해 온도조절기가 설치되어 있다.

2.4.7 현장 음향센서

구동기의 청정구역에는 가속도형 진동 검출 방식의 현장 음향 센서가 부착되어 있어서 운전 중에 발생하는 소리를 제어반의 현장 음향 상자로 보낸다. 현장 음향 상자에는 각 구동기와 통로선택기에 설치되어 있는 센서로부터 입력되는 진동신호를 음향으로 바꾸어 스피커를 구동하는 앰프가 설치되어 있다. 5개의 입력신호는 선택적으로 또는 모두 동시에 믹스하여 청취할 수 있고, 소리의 크기를 조정하는 볼륨이 있다.

2.4.8 인버터 상자

구동기의 구동모터는 3상 4극 440V 1마력(0.75KW) 유도전동기이고 모터의 속도제어는 차단기실(Switch Room)에 설치되어 있는 인버터에 의해 수행된다. 인버터에서는 주파수와 전압이 동시에 제어되는데 주파수는 회전속도에 비례관계가 있지만 유도전동기의 특성상 슬립이 발생하므로 원하는 회전속도의 동기 주파수보다 보다 조금 높게 설정되어 있다. 인버터의 동기 주파수는 저속에서 6.27 Hz이고 고속에서 60 Hz로 설정되어 있다. 인버터 상자에는 써지 필터가 설치되어 인버터로 입력되는 발전소 전원 전압이 3상 480VAC이므로 인버터에서 고주파 조영 방식으로 스위칭되는 펄스의 전압은 $\sqrt{2} \cdot 480 = 678.8V$ 로서 전원 케이블의 절연 내압 허용값 600V를 초과하므로 이로 인한 절연파괴를 막기 위함이다. 그 밖에 서지 필터는 스위칭으로 인한 펄스 전류를 제거하여 다른 계통의 케이블에 유도되는 전압을 최소화하는 역할도 수행한다.

3. 결 론

영광 2호기 노내 핵계측 계통 설비 개선을 통하여 아래와 같은 기대 효과가 있다.

- 1) 설비의 안정적 운영을 통해 원전의 안전성 제고와 이용률 향상에 기여
- 2) 기존설비의 단점을 보완하고 신뢰성을 향상시키는 구조의 구동설비 개조
- 3) 디지털 제어방식을 도입하고 MMI(Man Machine Interface)에 Windows 방식을 채용하는 사용자 편의성이 향상된 제어설비의 개조
- 4) 고장률 감소와 정비편의성을 최대한 반영하여 작업자들의 방사선 피폭을 대폭 저감
- 5) 설비의 국산화로 지속적인 기술축적과 예비품 확보 등을 위해 추가 제작과 정비 및 점검 기술지원이 가능

[참 고 문 헌]

- [1] 전력연구원, "고리 3,4호기 노내 핵계측 계통 최종보고서", 2006
- [1] 전력연구원, "영광 2호기 노내 핵계측설비 운영보고서", 2007