

혁신적인 중성자 속 분포 측정 시스템의 개발

조병학(한전전력연구원), 신창훈*(한전전력연구원), 변승현(한전전력연구원), 박준영(한전전력연구원), 양장범(한전전력연구원)

Development of Innovative Neutron Flux Mapping System

Byung-Hak Cho(KEPRI), Chang-Hoon Shin*(KEPRI), Seung-Hyun Byun(KEPRI), Joon-Young Park(KEPRI), and Jang-Bum Yang(KEPRI)

ABSTRACT

An innovative in-core neutron flux mapping system has been developed and applied successfully for service in a commercial pressurized water reactor. With the benefit of double indexing path selector (Dips[®]) mechanism, the reliability of the detector drive system has been improved five times higher than that of conventional systems, and the problems caused by the serious friction generated between the detector cable and guide tubing has been solved completely because the Dips[®] architecture allows the detector guide tubings to have larger curvature and shorter length in nature. The simple and fast maintenance is particularly emphasized in the detector drive system to secure minimum radiation exposure to the maintenance personnel by optimizing the number of components and providing easy access to the components. The programmable logic controller based digital controller with Windows[®] based operator's console provides fully automated and user friendly operation and maintenance support means.

Key Words : Neutron flux mapping (중성자 속 분포), Nuclear plant (원자력 발전소), Instrumentation and control (계측 제어), Digital control (디지털 제어)

1. 서론

노내(in-core) 중성자 속 분포 측정 시스템(neutron flux mapping system, FMS)은 가압 경수로형 원전의 원자로 내부를 이동형 검출기를 사용하여 원자로 내의 지정된 통로를 통하여 상하로 이동하면서 중성자 속의 분포를 측정하기 위한 시스템이다. 측정된 정보는 원자로 노심 설계 변수들을 확인 가능하게 하며, 노심 주기 동안의 특정 시간에 대한 핵분열력 분포(fission power distribution)를 확인할 수 있게 한다. 그리고 FMS는 플랜트 안전성에 관한 중요한 정보를 제공하기 때문에, 본 시스템의 기능 상에 문제가 발생하는 경우에는 플랜트의 출력(power)을 줄이거나 운전을 정지해야만 한다.

한전 전력연구원(KEPRI)에서는 고리 1 호기에서 사용중인 노후화된 시스템의 성능을 개선하기 위하여 본 새로운 FMS를 개발하였다. 상술하면, 전술

한 고리 1 호기에 설치된 기존의 FMS는 25년 이상의 긴 운영으로 인한 노후화와 예비품의 단종으로 인해 정비에 많은 비용과 어려움을 겪고 있었다. 특히 고방사선 지역인 원자로 격납 용기(reactor containment vessel)에 위치한 검출기 구동 시스템에서 작업해야 하는 작업자에 대한 방사선 쏘임의 불가피성으로 인해 시스템을 유지 보수하는데 있어서 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한, 시스템의 기능성 저하로 인하여 값비싼 검출기 케이블에서 발생하는 잦은 고장은 또 다른 문제점의 하나이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 KEPRI는 검출기 구동 시스템과 디지털 제어 시스템을 포함하는 혁신적인 노내 중성자 속 분포 측정 시스템을 개발하였다. 본 시스템의 검출기 구동 시스템은 본 연구에서 새로이 제안하는 Dips[®](Double indexing path selector) 구조 상에 구현하였으며, 검출기 구동 시스템의 신뢰성은 Dips[®] 구조로 인하여 기존의 시

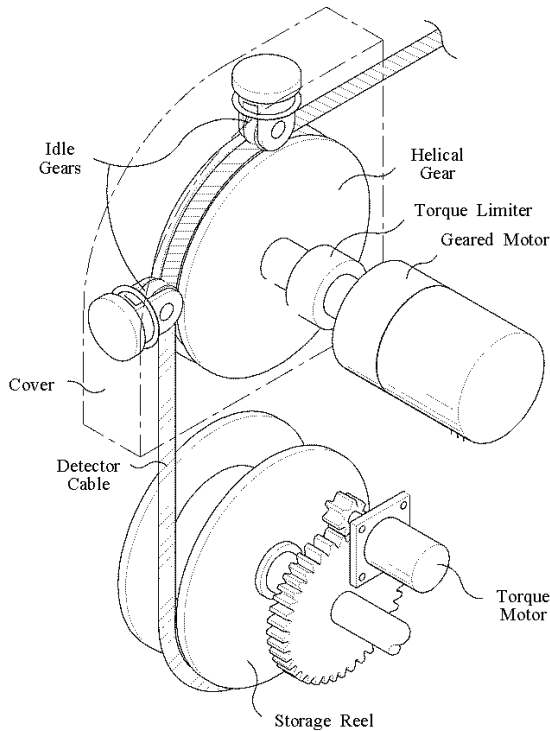


Fig. 1 Internal of detector cable drive

스텝에 비하여 5 배 향상시킬 수 있었다. 그리고, 기존의 시스템의 전형적인 문제점의 하나인, 매우 심하게 구부러진 안내 배관에서 검출기 케이블에 가해지는 심각한 마찰력 또한 완전히 해결될 수 있었다. 이는 Dips® 구조로 인해 더 큰 곡률을 가지면서 더 짧은 길이를 가지는 안내 배관의 적용이 가능하기 때문이다. 게다가, 검출기 구동 시스템은 고방사능 지역에 위치해있기 때문에, 단순하며 빠른 정비가 필요하다. 본 시스템은 이러한 점을 고려하여 구성 요소의 수를 최소화하였고 주기적인 정비가 필요한 구성 요소들에 대한 접근의 용이성을 제공하도록 하였다. 상기한 검출기 케이블에 가해지는 낮은 마찰력과 검출기 구동의 높은 효율성으로 인해 Dips® FMS의 검출기 구동은 검출기를 핵연료 다발의 상부위치까지 도달하게 만드는 데에 있어서 기존의 시스템에 비해 2/3의 힘이 소요한다. 뿐만 아니라, 중성자 속 분포의 데이터를 취득하는 과정 동안에 발생하는 검출기 속도의 변화는 단지 0.1mm/second의 표준 편차를 가질 만큼 낮다.

이와 더불어 Windows 기반의 작업자 콘솔(console)과 PLC(programmable logic controller) 기반 디지털 제어기를 통하여 완전 자동화되고 사용자에게 친근한 작업 환경과 유지보수 수단을 제공하였다. 작업자 콘솔은 시스템 작동 상태에 대한 세밀한 정보를 제공하는 다양한 종류의 실용 함수들(utility functions)을 제공한다.

본 논문은 특히 본 연구를 통해 새로이 개발된 FMS의 기여도와 고리 1호기에의 적용 경험에 대하여 상세히 소개하고자 한다.

2. 검출기 구동 시스템

2.1 검출기 구동기(Detector Drive)

그림 1과 같이 검출기 케이블을 구동시키는 각 구동기는 기어 모터, 기어 모터에 연결된 헬리컬 기어, 검출기 케이블을 헬리컬 기어에 접촉시켜주는 아이들 기어로 구성되어 있다. 검출기 케이블은 케이블의 원주를 따라서 그 중심 주위로 장선이 나선형(spiral wire)으로 감겨진 형태를 가지고 있다. 구동기는 또한 일정한 힘으로 검출기 케이블을 당기기 위한 저장 릴(storage reel)을 구동하는 AC 토크 모터와 구동기의 상태를 원격으로 감시하기 위한 음향 센서를 포함한다. 헬리컬 기어는 원주 표면에 나선형의 홈(spiral groove)을 가진 홈통이 형성되어 있다. 헬리컬 기어가 회전할 때 검출기 케이블의 나선선과 헬리컬 기어의 나선형 홈이 맞물린 상태로 검출기 케이블이 움직이게 되고, 통로 선택기를 통해서 원자로 내부로 삽입되게 된다. 그리고, 음향 진동 센서는 구동기에서 발생하는 진동 신호를 감지하여 제어실에서 구동기를 원격 감시할 수 있게 해준다.

2.2 통로 선택기(Path Selector)

가압 경수로형 원전의 이동형 검출기형 중성자속 분포 측정 시스템은 보통 36-50개의 심플관(thimble)을 가지는 반면, 검출기 구동기는 단지 4개만을 사용한다. 따라서, 다층식 통로 선택기가 필요하다.

기존의 통로 선택 시스템은 각 층에 4개의 독립적인 통로 선택기가 할당된 2층의 구조를 가지고 있다. 반면에, 본 연구에서 제안하는 Dips® 구조는 그림 2와 같이 내부 통로 선택기와 외부 통로 선택기로 구성되어 있다. 기존의 시스템과는 달리, Dips® 구조는 단층 구조를 가지기 때문에 검출기 유도 배관의 곡률이 더 커질 수 있고, 배관이 전체 길이도 더 짧아질 수 있다. 따라서, 유도 배관 내에서 검출기 케이블에 가해지는 마찰력은 더 이상 문제점이 되지 않는다. 또 다른 이점은 Dips® 구조는 기존의 시스템에 비해 5/8 정도의 작은 수의 구성 요소로 이루어져 있다는 것이다. 이러한 이유로, Dips® 구조는 더 신뢰성이 있고, 유지 보수하기도 쉽다. 또한, 기존의 시스템은 하부 층의 통로 선택기 중의 하나가 고장이 날 경우에는 심플관의 일부를 검사할 수 없었다. 하지만, Dips® 구조는 그러한 경우에 다른 내부 통로 선택기가 비정상적인 내부

3. 제어 시스템

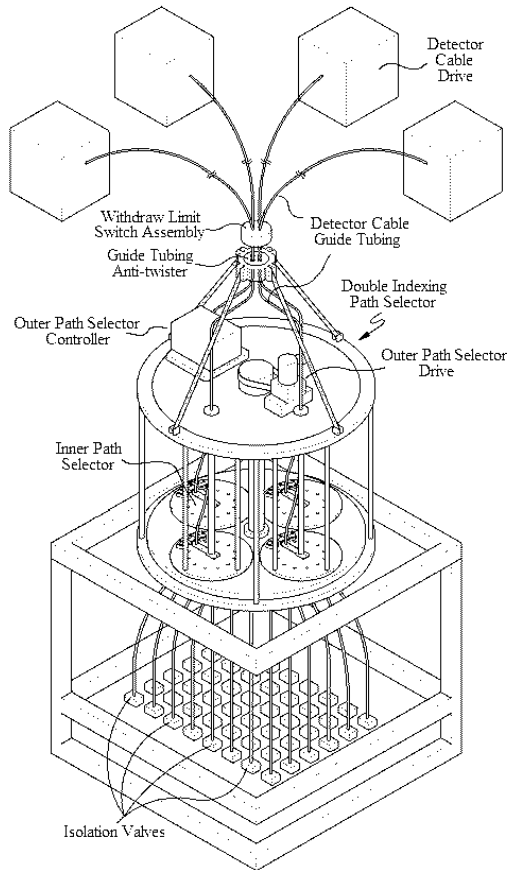


Fig. 2 FMS with Dips® architecture

제어 시스템은 검출기 구동 시스템의 제어, 작업 상태의 감시, 비정상적인 작동의 판별을 수행한다. 2 개의 작업자 콘솔, PLC, 자동이득제어가 가능한 4 개의 검출기 동력 공급기(power supply), 구동 모터 수동 조작반을 수용할 수 있도록 제어실에 2 개의 패널(panel)이 제공된다. 2 개의 작업자 콘솔은 작업자의 명령을 받아들이고 검출기의 위치를 나타내주며 검출기의 위치에 따른 중성자 속 분포를 화면에 출력해주기 위하여 제공된다. 디지털 제어 시스템은 PLC(Allen-Bradley 에 의해 제공된 Control Logix)와 작업자의 콘솔로서 사용되는 산업용 컴퓨터로서 형성된다. 이 시스템은 계층적 구조(hierarchical architecture)를 가지며, 정보를 공유하기 위하여 이더넷(Ethernet) 컴퓨터 통신을 사용한다. 그림 4는 작업자 콘솔의 주 제어 윈도우(main control window)를 보여준다.

중성자 속 분포 측정 작업은 작업자 콘솔로부터 작업 모드를 선택하고 이에 해당하는 과정을 수행하는 일련의 과정으로 구성되어 있다. 심블관의 모두 또는 일부는 모드 선택에 따라 선택적으로 맵핑될 수 있다. 자동 모드가 수행될 때에는 맵(map)이 가능한 빨리 생성될 수 있도록 모든 4 개의 검출기가 각기 다른 심블관으로 동시에 삽입된다. 작업하는 동안 4 개의 구동기와 경로 선택기에서 발생하는 소리는 패널에 제공되는 스피커를 통해서 사용자에게 선택적으로 제공될 수 있다. 이 소리는 운전 중 발생하는 이상 증상을 즉시 확인 가능하게 하는 유용한 정보를 작업자에게 제공해준다.

값비싼 검출기가 헬리컬 기어 홈(groove)에 끼어 파손되는 것을 방지하기 위하여 안전 제한 스위치(safety limit switch)가 사용되고, 검출기에게 기준 위치를 제공하기 위하여 인출 제한 스위치(withdraw limit switch)가 사용된다. 각각의 안전 및 인출 제한

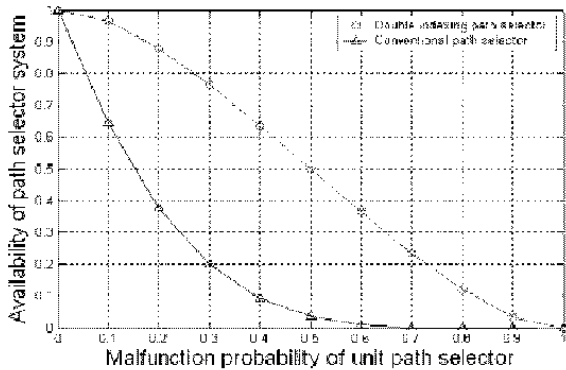


Fig. 3 Availability of path selector system with respect to probability of unit path selector failure.

봉로 선택기를 대체할 수 있도록 회전 가능하다. 그림 3은 단위 봉로 선택기의 고장 확률에 대한 Dips® 구조와 기존 시스템의 구조의 신뢰성을 나타낸 것으로, 단위 봉로 선택기에 대해 3년에 1회 정도 고장이 발생하는 것을 고려하면 Dips® 구조의 신뢰성이 기존의 구조에 비해 5배정도 더 높은 것을 확인할 수 있다.

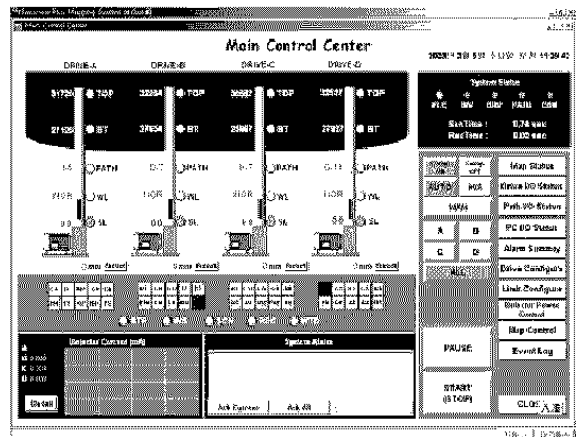


Fig. 4 Main control window of operator's console

스위치로는 비접촉식 근접 리드 스위치(non-contact type self-contained proximity reed switch)가 사용된다. 이 스위치는 반도체 소자를 포함하지 않기 때문에 방사능 노출에 강하며, 검출기 유도 배관에 구멍을 뚫지 않아도 된다는 장점을 가지고 있다.

검출기, 검출기 구동기, 내부 룬로 선택기로 구성된 한 검출기 구동 그룹의 기능에 이상이 생긴 경우에는 외부 룬로 선택기가 회전하여 그 그룹에 속한 심블관들이 인접한 다른 그룹에 의해 측정되도록 한다. 이 경우에 비록 다른 그룹에 의해 측정되지만 검출에 필요한 Dips® FMS의 케이블의 길이는 변화하지 않는다. 이는 기존의 룬로 선택 시스템이 갖기 못한 특성으로, 시스템이 일정한 데이터에 의해 제어될 수 있다는 점에서 매우 중요하다.

검출기 구동기는 검출기의 위치를 측정하기 위하여 4 개의 광학 엔코더를 가지고 있다. 엔코더는 헬리컬 기어가 1 회전 할 때 마다 4000 개의 펄스를 발생시킨다. 헬리컬 기어의 직경이 247.4mm 이므로, 검출기의 위치는 0.1943mm 분해능을 가진다.

검출기 구동 시스템은 약 50.96rads/month 의 고 방사능 환경에 설치되므로, 방사능에 약한 전기 장치를 적용하면 안 된다. 이러한 이유로 시스템에 장착된 전기 장치는 시험 결과 10krads 까지 기능성에 문제가 없었던 4 개의 엔코더와 5 개의 음향 센서로 제한된다. 따라서, 본 시스템은 10년 이상 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 고리 1 호기에 대한 현장설치 및 실증시험

개발된 FMS는 고리 1 호기의 계획예방정비기간(refueling outage period)동안에 기존의 시스템을 대체하여 설치되었다. 대체 계획은 정상적인 계획예방정비기간을 연장시키지 않도록 최적의 일정으로 세웠고, 제어실과 원자로 격납 용기에서 동시에 진행되었다. 기존 시스템의 제거와 새 시스템의 설치에는 각각 2 일과 3 일이 소요되었다. 발전소 기동 후 새 FMS를 통한 노내 중성자 분포 측정 작업이 원

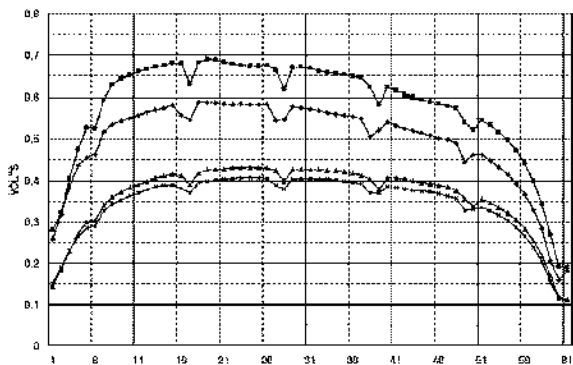


Fig.5 Distribution of neutron flux at 100% reactor power

자로 출력 5%, 75% 및 100%에서 수행되었고, 개발된 설비를 이용하여 성공적으로 데이터를 취득하였다. 그림 5는 원자로 출력 100%시 4 개의 심블관에 서 동시에 측정된 중성자 속의 분포를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 검출기 구동을 위하여 새로이 제안한 Dips® 구조를 채택하였고 이를 적용한 혁신적인 노내 FMS를 개발하였다. 특히 본 시스템의 룬로 선택기는 이러한 구조를 통해 최소의 구성요소로 구성된 단층의 구조를 가지도록 설계되었다. 또한, Dips® 구조는 검출기 케이블의 마찰력을 최소화할 뿐만 아니라 시스템의 신뢰성을 향상시켜준다. 검출기 구동은 헬리컬 기어 외주(circumference)의 특정 위치에 장착된 아이들 기어를 사용하여 최대 효율을 가지도록 설계하였다. 룬로 선택기의 낮은 마찰력과 검출기 구동의 높은 효율성으로 인해, 중성자 속 분포의 데이터를 취득하는 과정 동안에 발생하는 검출기 속도의 변화는 단지 0.1mm/second의 표준 편차를 가지도록 최소화되었다. 개발된 본 시스템은 작업자의 방사능 쏘임을 줄여주고, 매우 신뢰성 있는 중성자 속 분포 데이터를 제공함으로써 원자력 발전소의 안정성을 강화해준다. 상기한 FMS는 2003년 2월 고리의 1 호기에 설치되어 1년 동안 성공적으로 운영된 바 있고, 고리 1 호기의 공식적인 보고에 의하면 본 FMS가 적용된 이후에 1년 동안 방사선 쏘임량이 2,260 mRem 만큼 감소시킬 수 있었다.

참고문헌

1. "The Development of an Advanced In-Core Instrumentation Drive System for Kori Unit 1 (Final Report of 99NS03)," KEPRI, Mar. 2003.
2. "The Development of Control Equipment for In-Core Flux Mapping System (Final Report of 99NS03)," KEPRI, Feb. 2002.
3. "Technical Manual for In-Core Instrumentation of Korea Electric Company Kori Unit No.1," Westinghouse Nuclear Energy Systems.
4. "Technical Manual for Flux Mapping System Detector Drive Train Standardized for Nuclear Power Plant," Teleflex Inc.
5. Final Safety Analysis Report (FSAR) of Kori #1 Unit.
6. "Survey of Radiation Exposure Rate at In-Core Instrumentation Drive System Area," TM.99NS03. P2001.285, KEPRI, Sep. 2001.