

원자력발전소 노내 중성자 분포 측정 설비의 검출기 구동시스템 개발

조병학, 신창훈, 변승현  
한전 전력연구원

Developing the Detector Drive System of In-core Flux Mapping System for Nuclear Power Plant

Byung-hak Cho, Chang-oon Shin, Seung-hyun Byun  
KEPRI

**Abstract** - 원자력발전소의 노내 중성자 분포 측정 설비는 고장이 발생하여 기능을 상실하면 발전소를 정지하여야 하는 매우 중요한 설비이다. 국내 가압 경수로형 원전에 사용되고 있는 노내 중성자 분포 측정 방식은 이동식과 고정식으로 구분되며, 고리 1, 2, 3, 4호기, 영광 1, 2호기 및 울진 1, 2호기처럼 미국 웨스팅하우스사와 프랑스 프라마토사가 공급한 원전은 이동식 측정 방식을 채택하고 있고, 그밖에 미국 CE사가 공급한 원전 및 한국 표준형 원전은 고정식 측정 방식을 채택하고 있다. 이동식의 경우 측정 설비의 검출기 구동시스템은 원자로 내부에 설치되어 있는 심블에 검출기를 삽입 또는 인출하면서 검출기가 중성자 분포 정보를 취득할 수 있도록 기계적인 구동 메커니즘을 제공한다. 기존 설비는 협소한 공간에 통로선택기를 복층으로 배치하여 검출기가 지나가는 통로의 구배가 심한 관계로 마찰이 커져 구동설비에 잦은 고장이 발생하였고, 구조적으로도 신뢰성이 떨어지는 문제점을 갖고 있었다. 본 논문에서는 신뢰성이 높고 통로에서의 마찰이 적은 새로운 개념의 이중색인 통로선택기와 구동장치의 설계와 제작 및 적용 결과 등을 다룬다.

구동설비와 제어실에 설치되는 제어설비로 구분된다. 개발된 구동시스템은 검출기를 삽입 또는 인출하는 구동기 4대와 통로선택기로 구성된다. 구동기는 A, B, C, D 4개로 나누어지며 각각 1개씩 총 4개의 검출기가 설치된다. 검출기는 원자로 내부에 설치된 심블 속으로 이동하면서 중성자 분포를 측정하는데, 통로선택기의 동작모드에 따라, A는 D와 B, B는 A와 C, C는 B와 D, D는 C와 A의 패스에서 측정 작업을 수행할 수 있다. 교정모드에서 각 검출기는 공통 교정 패스(Common Calibration Path)를 통과함으로써 4개 검출기의 상관관계 정보를 도출하고, 저장모드에서 작업 종료 후 방사선이 많이 방출되는 검출기는 안전하게 차폐구역에 저장된다.

구동기는 모터/기어, 토크 리미터, 검출기 위치전송기, 검출기가 부착되어 있는 나선형 케이블을 삽입 또는 인출하는 헬리컬 기어장치, 케이블 저장 릴, 모터 제어기 및 기타 부속장치로 구성된다. 통로선택기는 4대의 구동기에 의해 이동되는 검출기를 36개의 심블 중에서 선택적으로 배치시키는 기능을 수행한다. 개발된 통로선택기는 기구학적으로 신개념의 이중색인(Double Indexing) 방식을 채용함으로써 단층 구조를 갖는다. 이중색인 통로선택기는 4개의 내부통로선택기와 1개의 외부통로선택기 및 인입배관의 꼬임을 방지하는 꼬임방지장치로 구성된다. 그림 1은 개발 구동설비를 배치한 노내 중성자 분포 측정 설비의 전체 구성을 나타낸다.

1. 설비개요

노내 중성자 분포 측정 설비의 검출기 구동시스템은 기존설비의 경우 4개의 구동기와 이들 구동기와 직결되어 있는 4개의 5-Path 통로선택기 및 4개의 10-Path 통로선택기로 구성된다. 그런데, 5-Path 통로선택기와 10-Path 통로선택기는 좁은 공간에서 2층으로 배치되어 배관의 곡률을 크게 감소시켜 검출기의 나선형 케이블과 배관 사이에 심한 마찰을 유발시킨다. 마찰을 극복하기 위해 검출기 케이블을 밀고 당기는 구동기는 더 큰 구동력을 요구하고, 결국 케이블과 구동부의 마모를 초래하여 잦은 고장의 원인이 되었다.

이동형 설비의 근본적인 문제는 긴 심블 튜빙에 Flexible한 검출기 케이블을 밀어 넣는 것이 어렵다는 데 있으며, 문제 해결을 대부분 심블 튜빙의 Cleaning에 두어 왔다. 웨스팅하우스사에서는 이 문제를 힘의 전달 관점에서 조사하여, 많은 발전소에서 검출기 구동기의 구동력이 70파운드(31.75Kg)이상임에도 불구하고, 심블 입구에서는 불과 몇 파운드 밖에 되지 않는 현상을 관측했다. 이는 통로선택기와 배관 연결부에서 대부분의 힘손실이 발생함을 의미하므로 밀어 넣는 힘을 증가시키면 이 문제가 개선될 것으로 기대하였다. 그러나 구동력을 증가시키면 구동기와 검출기 케이블에 심한 스트레스를 주어 고장의 원인이 되어, 대안으로 Reduced Size Tubing, Reduced Size Detector, Frictionless Limit Switch를 채용하여, 심블 입구에서의 Spiral 케이블의 힘을 50% 정도 증가시켰다. 그러나, 검출기 자체는 구부러지지 않는 부분이 있어 배관의 구경을 줄이는 데에는 한계가 있으므로 근본적으로 배관의 곡률을 증가시켜 배관 구배를 완화하는 것이 최선의 해결책이라 할 수 있다. 문제점 해결을 위하여 기존 복층 구조의 통로선택기를 단층화하여 배관 구배를 완화하고, 인버터 구동방식의 정밀한 구동성능을 갖는 검출기 구동시스템의 개발이 추진되었다.

2. 개발 시스템의 구성

노내 중성자 분포 측정 설비는 원자로 격납건물에 설치되는

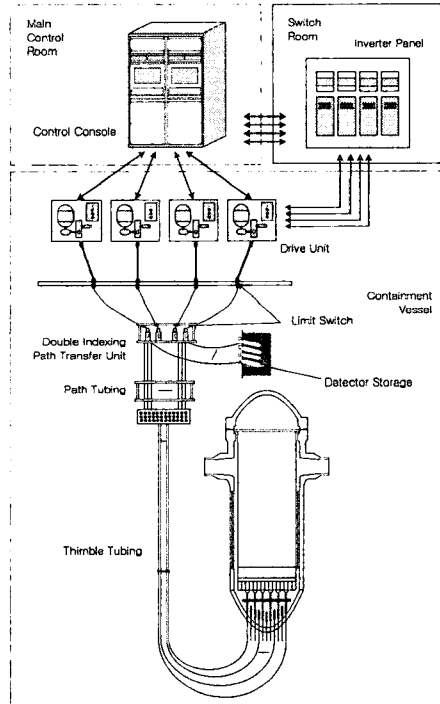


그림 1. 노내 중성자 분포 측정 설비의 구성

### 3. 구동시스템의 설계 및 제작

#### 3.1 구동기(Drive Unit)

##### 3.1.1 모터/기어와 토크 리미터

모터와 기어는 헬리컬 기어와 함께 나선형 케이블을 구동하는 역할을 수행하며, 나선형 케이블에 과도한 힘이 가해지는 것을 방지하기 위하여 기어와 헬리컬 기어 사이에 토크 리미터가 접속되어 있다. 모터 감속기와 토크리미터와 관련된 설계 사양은 다음과 같다.

- ① 모터/기어: 삼상 440V, 60Hz, 750W, 50:1 감속기어
- ② 토크리미터:  $5 \pm 2$  [Kgf.m] (설정값 = 3.6435 [Kgf.m])
- ③ 최대 삽입력:  $29.45 \cos(43.10^\circ) = 21.50$  [Kgf]

##### 3.1.2 위치 검출기

위치검출기는 검출기의 위치를 측정하기 위한 목적으로 사용되며, 고리 1호기 구형설비에서는 Absolute 방식의 기계식 엔코더를 사용하였다. 개발 설비에서는 광학적 엔코더를 채용하였는데 엔코더가 방사선에 약한 면을 고려하여 충분한 실험과 방사선 조사시험을 거친 후 결정하였다. 채용된 엔코더는 헬리컬 기어가 1회전 할 때 1000개의 펄스를 발생하여 약 0.78mm의 해상도를 가진다.

##### 3.1.3 헬리컬 기어 장치

고리 1호기의 헬리컬 기어 장치는 고정식 덮개로 되어 있다. 고정식 덮개는 나선형 케이블과 마찰을 유발하여 헬리컬 기어의 토크를 감소시킬 뿐만 아니라 마모가 심한 경우에는 나선형 케이블을 손상시킬 수도 있다. 개발 설비에서는 마찰이 적은 Roller Guide 방식을 채택하였다.

##### 3.1.4 케이블 저장 릴과 구동장치

케이블 저장 릴은 나선형 검출기 케이블을 일정한 힘으로 당기면서 감거나 풀어주는 역할을 한다. 고리1호기의 구형 설비에서는 판 스프링을 2중으로 감아 일정한 토크를 내도록 고안된 스프링 모터를 사용하였으나, 개발 설비에서는 회전수에 따른 토크 특성이 저장 릴에 알맞고 정비가 용이한 AC 토크모터를 채용하였다.

##### 3.1.5 모터 속도제어기

기존의 제어기는 3상 동기모터를 사용하여 고속(3600rpm)에서는 1/2결선, 저속(600rpm)에서는 Y결선하여 운전하는 방식을 사용하고 있다. 개발 설비에서는 정밀 속도제어가 가능한 인버터 제어 방식을 채택하였다.

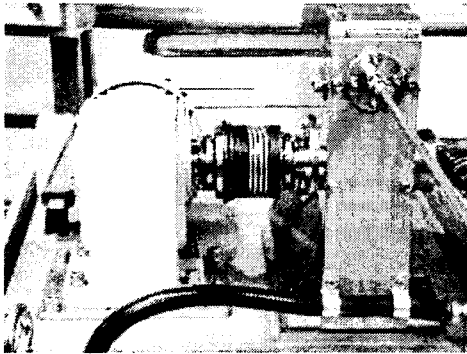


그림 2. 구동기 주요부

#### 3.2 이중색인(Double Indexing) 통로선택기

이중색인 통로선택 방식은 기존설비의 하부 통로선택기 4개를 한 개의 장치로 묶고 이것을 다시 4분할로 색인하여 상부 통로선택기를 생략하는 방식이다. 그림 3은 이중색인 통로선택기의 내부통로선택기와 외부통로선택기의 구조를 보이고 있다. 각각의 12-Path 내부통로선택기의 회전축에는 S모양의 튜브가 들어 있어 바닥판에 있는 통로를 선택하고 회전축의 상부

에는 4개의 마이크로 스위치와 캠으로 구성된 위치 스위치가 설치되어 있다. 그 하단에는 12분할 제네바 기구가 설치되어 있어 회전축을 구동한다. 내부통로선택기는 외부통로선택기에 내장되어 있으며 외부통로선택기의 구동부와 제어부는 외부통로선택기의 상부에 설치되어 있다. 주요부품의 설계사양은 다음과 같다.

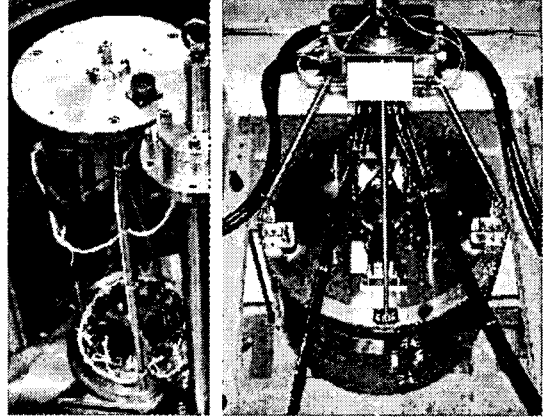


그림 3. 내부통로선택기와 외부통로선택기의 구조

##### 3.2.1 내부통로선택기

###### ① 구동모터

통로선택기에 사용되는 구동모터는 전자식 브레이크와 정밀급 토크리미터를 장착하고 있으며 감속기어와 결합하여 60rpm으로 회전한다. 또한, 산업표준사양의 제품으로 정비 및 예비품 확보가 용이하다.

###### ② 제네바 기구

제네바 기구는 기어모터의 연속적인 회전을 간헐적인 회전운동으로 변환한다. 개발 설비에는 12분할의 것이 사용되었으며 구동모터가 1회전할 때 1/12 회전한다.

###### ③ 토크 리미터

제네바 기구를 구동하는 회전축에는 토크리미터(0.113 Kgf.m로 설정)가 부착되어 있어서 걸림이 발생하면 회전력이 풀리게 된다.

###### ④ 위치 스위치

제네바 기구 하단에는 캠 정지 스위치가 부착되어 있어서 기어모터가 1회전할 때마다 모터를 정지하여 제네바 기구가 1/12 회전한 후에 정지하게 한다. 12패스 내부통로선택기의 위치를 감지하는 4개의 캠 위치 스위치의 신호는 주 제어실 제어반에서 BCD 코드로 변환된다.

##### 3.2.2 외부통로선택기

###### ① 구동모터

외부통로선택기가 회전하면서 발생하는 마찰과 인입배관의 탄성을 극복할 수 있는 충분한 토크를 갖는 기어모터를 채용하였다. 실험으로 구한 전체 부하토크는 10Nm 이내이며 센터 폴리에 설치되어 있는 토크 리미터는 부하토크가 20Nm에 도달하면 구동력을 차단한다. 기어모터의 출력은 25W이고 기어비는 360:1이다. 이 기어모터는 1rpm으로 회전하며 센터 폴리와 타이밍 벨트로 결합되는데 탄성을 갖는 재질의 타이밍 벨트는 정지 시에 발생하는 충격을 흡수하는 장점이 있다.

###### ② 포입방지장치

이중색인 통로선택기는 내부통로선택기 4대를 회전시키는 구조이므로 구동기와 연결되는 인입배관에서 포입이 발생한다. 포입 현상은 배관의 회전과 이동으로 구분되는데 회전은 로터리 조인트를 통로선택기 상부에 설치하여 분리하였고 이동 현상은 배관의 탄성으로 흡수된다.

###### ③ 제한 스위치 집합체

포입방지장치 바로 위쪽에 부착되어 있는 인출제한 스위치는 검출기 케이블에 의해 비접촉식으로 동작한다. 이 스위치는 검출기가 완전히 빠진 상태 즉 인출 램프가 켜진 상

태가 아니면 외부통로선택기와 내부통로선택기가 동작하지 못하게 연동되어 있다.

(4) 위치제어 센서박스

위치제어 센서박스는 외부통로선택기 상부에 설치되어 외부통로선택기의 위치를 제어하는 역할을 한다. 통로선택기 외함 상부에는 외부통로선택기의 회전을 고정시키기 위한 3개의 위치 포스트가 설치되어 있고, 이 포스트는 센서박스에 있는 래치와 결합하거나 결합이 해제된다. 래치는 방사선에 강한 엔지니어링 플라스틱인 Ultem으로 제작되어 스텐레스강으로 되어있는 포스트와 큰 마찰이 없이 동작하도록 하였다. 이 래치는 스프링에 의해 포스트와 결합하고 솔레노이드에 의해 결합이 해제된다. 센서박스 중앙에 있는 CPS(Center Position Switch)는 위치 포스트에 의해 밀리면서 동작하고, 좌우 양쪽에는 LPS(Left Position Switch)와 RPS(Left Position Switch)가 각각 설치되어 있어서 외부통로선택기의 회전방향을 감지한다. LPS와 RPS는 외부통로선택기의 함체에 설치되어 있는 브라켓에 근접하면서 동작한다.

3.3 복층식과 단층식 통로선택기의 장단점 분석

기능적인 면에서 검출기의 나선형 케이블과 배관 사이의 마찰이 매우 중요하게 작용하며 과도한 마찰은 구동기의 토크단증가시켜 케이블을 손상시킨다. 구형 복층식 설비의 경우 마찰은 주로 통로선택기와 통로선택기 사이 및 셸 테이블과 통로선택기 사이의 배관에서 구배가 심한 경우 심각하게 발생하는 것이 관측되었다. 그러나 개발 설비에서는 배관의 구배를 완만하게 하여 마찰을 줄임으로서 전체 시스템을 안정적으로 운전할 수 있는 장점을 가지고 있다. 기존 고리 1호기의 통로선택기 중에서 배관의 굽힘이 가장 심한 10 Path 통로선택기와 밸브 사이 배관의 길이와 각도를 계산해 보면 아래의 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이중색인 통로선택기를 고리1호기에 사용했을 경우 배관 길이와 각도는 표 2와 같다. 기존의 5-Path와 10-Path 통로선택기를 갖는 복층식 통로선택기의 것과 비교하여 배관 각도가 현저히 작아진 것을 볼 수 있다. 특히, 최대 각도의 경우 복층식이 40도를 초과하는 데에 비해 이중색인 방식에서는 23도 이내여서 나선형 케이블과 배관 사이의 마찰을 현저히 감소시킬 수 있다.

표 1. 고리 1호기 통로선택기 배관의 길이와 각도

		시스템 그룹			
		A	B	C	D
배관길이 (cm)	평균	170.19	164.39	168.34	166.68
	최대	185.53	204.49	180.18	196.76
배관각도 (도)	평균	25.489	19.041	23.663	20.644
	최대	34.772	41.819	32.244	39.236

표 2. 이중색인 통로선택기 배관의 길이와 각도

		시스템 그룹			
		A	B	C	D
배관길이 (cm)	평균	253.69	250.90	251.46	250.82
	최대	265.28	265.86	265.28	261.51
배관각도 (도)	평균	14.197	11.917	11.773	10.801
	최대	22.665	22.960	22.665	20.596

설비의 신뢰성 측면에서 통로선택기가 정상적으로 동작할 수 있는 조건은 이중색인통로선택기의 경우 내부통로선택기에 고장이 발생하더라도 외부통로선택기가 정상이면 전체의 통로선택시스템의 기능이 정상적으로 동작하지만 구형 복층식 통로선택기의 경우에는 외부통로선택기 4대는 반드시 정상이어야 전체 통로선택시스템이 정상적으로 동작한다. 그림 4는 이중색인방식과 복층식 통로선택시스템의 신뢰도를 비교하여 보여주는데 이중색인 방식이 구형 복층식에 비해 월등히 신뢰성이 높은 것을 볼 수 있다.

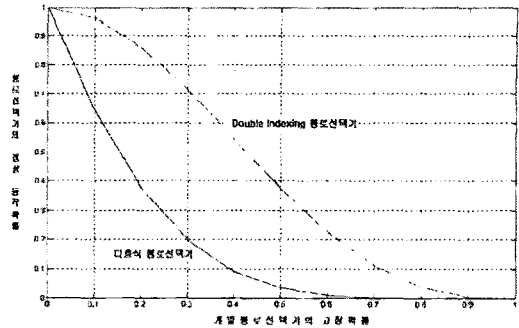


그림 4. 이중색인방식과 복층식 통로선택시스템의 신뢰도 비교

4. 현장설치 및 시험

개발된 노내 증성자 분포 측정설비의 검출기 구동시스템은 고리1호기 제21차 계획예방정비 기간(2002.12.29~2003.2.28)에 원자로 격납건물 속에 설치되었고, 실증시험을 수행하여 설비의 기능, 성능 및 유효성을 최종 검증하였다. 실증시험은 기능 및 성능시험, 구동속도 측정 시험으로 나누어 실시되었다.

4.1 기능 및 성능시험

개발된 검출기 구동시스템이 노내 증성자 분포 측정 작업에 요구되는 검출기 구동 메커니즘의 기능과 성능을 제공하는지에 대한 시험이 실시되었고, 기준을 만족함을 확인하였다. 수행된 시험항목은 아래와 같다.

- (1) 구동기 기동 시험(수동, 자동)
- (2) 통로선택기 기동 시험(수동, 자동)

4.2 구동속도 측정 시험

노내 증성자 분포 측정 작업은 검출기를 원자로 내부에 설치된 심플 속으로 이동시켜 상부에서 하부로 60.96mm/sec의 설계 속도로 이동하는 동안 일정한 시간 간격으로 증성자 분포를 취득함으로써 이루어진다. 따라서, 검출기의 정속도 유지에 측정 데이터의 신뢰도에 중요한 관련이 된다.

속도는 펄스 카운터 측정 장비를 사용하여 0.24mm/pulse의 해상도로 측정하였다. 측정결과 모든 원자로 심플에서 검출기의 구동속도는 설계속도 기준 표준편차 0.2mm/sec 이내에서 수용되었다.

[참고문헌]

- [1] "Technical Manual for In-Core Instrumentation of Korea Electric Company Kori Unit No.1", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [2] "Technical Manual for In-Core Instrumentation of Korea Electric Company, Kori Unit No.2", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [3] "Flux Mapping System Technical Manual for Korea Electric Company Korea Unit 5 and 6", Westinghouse Nuclear Energy Systems
- [4] "Technical Manual for Flux Mapping System Detector Drive Train Standardized for Nuclear Power Plant", Teleflex Inc.
- [5] "고리1호기 노내 핵계측 제어 논리 분석 보고서", 한전 전력연구원
- [6] "노내 핵계측 제어 시스템 개발에 따른 인허가 검토 보고서", 한전 전력연구원
- [7] "노내 핵계측 설비 분석 보고서", 한전 전력연구원
- [8] "원자력발전소 디지털 제어 시스템 설계 요건서 모델 개발", 한전 전력연구원
- [9] "고리1호기 노내 증성자 검출기 주변 방사선량 조사", 한전 전력연구원