

노내 핵계측 검출기 안내관 인출 및 삽입용 자동화 시스템 설계

Development of Thimble Handling Equipment for Nuclear In-Core Flux Mapping System

조병학*, 변승현**, 박준영***

Byung-Hak Cho, Seung-Hyun Byun, Joon-Young Park

Abstract - The in-core neutron Flux Mapping System in a pressurized water reactor yields information on the neutron flux distribution in the reactor core at selected core locations by means of movable detectors. The obtained data are used to verify the reactor core design parameters. The detector cables run through guide tubes(thimbles), and typically thirty-six to fifty-eight thimbles are allocated in the reactor depending on the number of fuel assemblies. These thimbles are inserted into nuclear fuel assemblies through conduits connected from the bottom of the reactor vessel to a seal table. During the plant refueling outage period, the thimbles are withdrawn up to 4m from the seal table, the height of a nuclear fuel. In spite of their importance, however, the thimble handling work has been performed by only human operators. In addition, its efficiency is very low due to narrow working environments on the seal table, thereby resulting in the excessive radiation exposure of maintenance personnel. To solve these problems, a new thimble handling equipment for in-core flux mapping system was developed, and we confirmed its effectiveness through experiments.

Key Words : Nuclear In-Core Flux Mapping, Detector Thimble, Seal Table

1. 서 론

노내 핵계측 계통의 검출기 안내관은 그림 1과 같이 원자로 운전 중에는 원자로 내부 핵연료 상부까지 삽입되어 원자로 내부에서의 중성자 분포를 측정하는 검출기의 이동 경로를 제공하다가, 핵연료 교체 시에는 그림 2와 같이 밀봉테이블(Seal Table)에서 핵연료 높이인 4m 정도까지 인출된다. 원자로 압력용기의 내부는 운전 중 압력이 높고 검출기 안내관 내부는 대기압 상태이므로 원자로 냉각수(경수)의 누출을 막기 위해 원자로 압력용기 하부부터 밀봉 테이블(Seal Table)까지 연결되어 있는 안내관 Conduit와 검출기 안내관 사이에 걸리는 압력차를 밀봉 테이블에서 밀봉하게 된다.

이와 같이 검출기 안내관은 원자로 냉각수 계통의 압력경계를 유지하는 안전성 등급의 중요한 설비임에도 불구하고 인출과 삽입을 위한 안내관의 취급은 의외로 낙후되어 작업자의 인력에만 의존하고 있는 실정이다. 안내관의 인출에는 보통 2~3명의 작업자가 일렬로 배치되는데, 자세를 안정적으로 취할 수 없는 열악한 환경으로 인해 작업자가 수직으로 일정한 힘을 유지하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 대부분의 안내관은 손으로 잡아 힘을 가하는 위치에서 굽혀지게 되고 삽입 시에는 굽혀졌던 부분이 안내관 Conduit와 접촉하면서 다시 펴지게 되며, 이와 같은 굽혀지고 펴지는

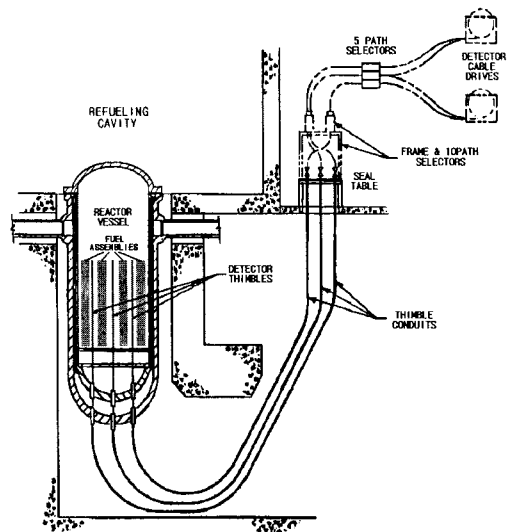


그림 1. 원자로가 운전 중일 때의 검출기 안내관 위치

동작이 반복됨에 따라 재질의 취화현상이 촉진되어 기계적으로 취약하게 되어 실제로 국내에서도 안내관이 파손되어 원자로 냉각수의 누출이 발생한 사례가 있었다. 또한, 안내관의 인출 및 삽입작업은 방사선 준위가 높은 밀봉 테이블 상부의 좁은 공간에서 수행해야 하므로 작업 인원을 수시로 교체해야 하는 등 작업 능률이 현저히 저하되었다. 이에 따라 노내

저자 소개

*韓電電力研究院 水火力發電研究所 責任研究員·工博

**韓電電力研究院 水火力發電研究所 先任研究員·工碩

***韓電電力研究院 水火力發電研究所 先任研究員·工博

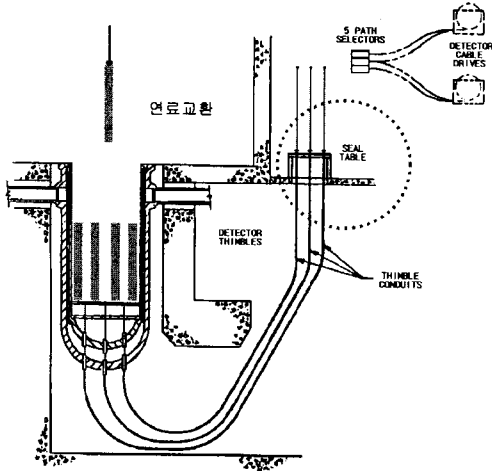


그림 2. 밀봉테이블에서 인출된 검출기 안내관

핵계측 계통의 안내관을 자동으로 인출하고 삽입하는 시스템의 개발이 현장에서 절실히 요구되었다. 본 연구개발 과제에서는 노내 중성자 검출기 안내관 인출 및 삽입을 위한 안내관 취급장비가 선진 외국에서도 개발된 사례가 없는 점을 감안하여 실현 가능한 여러 가지의 방법들을 동원하여 검출기 안내관 취급장비 기구들을 설계하고 프로토타입을 제작한 후 성능을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 검출기 안내관 취급기구

노내 중성자 검출기 안내관의 인출 및 삽입을 위한 안내관 취급장비는 원전 안전성 등급의 설비를 취급대상으로 하고 있고, 고방사선 환경에서 운전된다. 이와 같은 점을 고려하여 신뢰도가 높고 사용자 편의성이 높은 제품을 제작하기 위해 Collet Chuck 방식의 안내관 파지기구와 공압 Diaphragm 방식의 안내관 취급기구, Single Winch Roller 방식의 안내관 취급기구 및 Double Winch Roller 방식의 안내관 취급기구 등 다양한 방식들을 설계 시에 고려하였다. 그러나 검토결과 이들 중에서 Double Winch Roller 방식이 주어진 요건을 가장 잘 만족하는 것으로 평가되어 이 방식을 채택한 프로토타입을 제작하고 성능을 시험하였다. 표 1은 Double Drive Winch Roller 방식 안내관 취급기구의 사양을 보이고 있다.

2.2 In-Core 검출기 안내관 취급장비 제어기

노내 핵계측 검출기 안내관 취급장비의 제어/감시시스템은 그림 3과 같이 크게 1) 안내관 취급기구를 제어 및 감시하는 마스터 제어유닛과 2) 마스터 제어유닛을 무선으로 원격제어하며 안내관에 가해지는 힘의 분포를 감시 및 관리하는 원격 제어 및 감시 장치(PDA)와 3) 밀봉 테이블 상부에 인출된 안내관을 고정시키는 목적으로 설치되는 안내관 거치대에 위치하는 로컬 제어유닛으로 구성되고, 이들은 무선 또는 제어 케이블에 의해 정보를 교환한다. 마스터 제어유닛은 PC104 규격의 Pentium MMX급 산업용 컴퓨터, 이와 호환성

표 1. Double Drive Winch Roller 안내관 취급기구의 사양

적용 안내관 사양	THIMBLE OUT-DIA.	Ø7.95MM	
	THIMBLE IN-DIA.	Ø5.45MM	
	인출 및 삽입 거리	MIN4.5M-MAX6M	
MACHINE METHOD	THIMBLE MATERIAL	STS 316L	
	인출 및 삽입력	MAX : 50Kgf	
	MACHINE SIZE	257x192.1x343.5(MM)	
	MACHINE WEIGHT	15Kg±1Kg	
DRIVE METHOD	MACHINE MATERIAL	알루미늄합금 (7075T651)	
	MOTOR	with Planetary Gear Head	
	CAPACITY	2-150W (Graphite Brushes)	
	VOLTAGE	DC 0-48V (Adjust Type)	
	REDUCER(1.23ND)	PINION GEAR (113:1)	
WINCH ROLLER	SIZE	Ø42X182L(기어모터+엔코더)	
	ROLLER	SIZE	Ø82MMX32L(우레탄코팅)
		MATERIAL	HKS51/우레탄
		경도	HrC45이상/90°
	연신율	500%이상	
	CONTROL	SLOW STOP TYPE	
	THIMBLE SPEED	Max16M/Min	
SPEED 변동율	±1% (-10° - +70°C)		
THIMBLE CLAMPING METHOD	CLAMPING 힘	Max120Kgf	
	CLAMPING	수동조작 방식	
	FE/MALE SCREW	INCH8-29°(좌,우나사)	
	SLIDE BEARING	LM-BLOCK BEARING	
	SHAFT CLAMPING	POWER LOCK SYSTEM	
	MATERIAL	PB3/SKH51	
장치 CLAMPING METHOD	열처리경도	HrC45이상	
	CHUCKING TYPE	레버/나사조임 방식	
	LEVER ANGLE	FIXATION40°	
	CHUCKING TORQUE	2.5Kgf	
	CLAMPING HOUSING	각형 스프라인(II-TYPE)	
	ANGLE 분할 PIN	볼-프란자 (M8용)	
	열처리경도	SKH51/HrC45이상	
장치 CLAMPING	수동조작 방식		
POWER SOURCE	AC-POWER	AC110VX1PX60Hz	
	DC-POWER	DC5A - DC48V	
반수등급	공통적용 IP54등급		

이 있는 모터제어기와 아날로그 및 디지털 입출력 카드로 구성되어 시스템의 제어 및 감시환경을 제공한다. 로컬 제어유닛은 인출 또는 삽입 중에 있는 안내관이 흔들리지 않도록 일정한 장력을 인가하는 안내관 인장기(Tensioner)를 제어하고, 안내관을 미세하게 인출 및 삽입할 수 있는 Jog Mode 운전을 지원한다. 원격제어 및 감시장치는 무선으로 마스터 제어유닛과 통신하면서 1) 마스터 제어유닛에 있는 제어기의 제어 및 보호 로직에 사용되는 PID 게인, 가속도, 최대속도, 힘 제한치 등의 매개변수를 설정하며, 2) 원격으로 마스터 제어유닛을 제어하는 기능과 3) 전체 시스템의 실행상태를 모니터링하는 기능을 가지고 있다.

마스터 제어유닛 프로그램에 있어 정밀한 제어는 가장 중요한 기능이다. 안내관 인출 및 삽입장비 본체에는 안내관을 구동하는 2개의 드라이브 모터가 설치되어 있고, 로컬 제어유닛에는 안내관이 인출 및 삽입되는 동안 흔들리지 않도록 일정한 장력을 인가하는 Tensioner용 토크 모터가 한개 설치되어 있다. 드라이브 모터의 감속기어 헤드에는 안내관의 인출 및 삽입을 위한 Winch Roller가 설치되어 있고 기어헤드

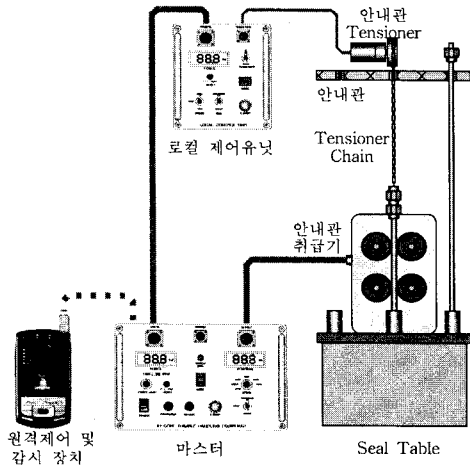


그림 3. 전체 검출기 안내관 취급장비의 구성

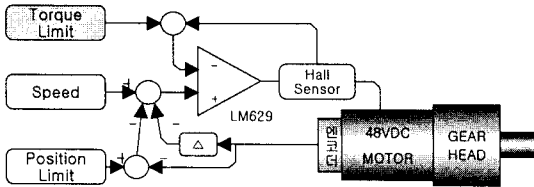


그림 4. 안내관 취급장비의 제어 및 감시 로직

반대편의 모터 회전축에는 엔코더가 설치되어 있다. 엔코더는 모터의 회전속도에 비례하는 일련의 펄스신호를 발생하며 회전방향을 감지하기 위해 A, B상의 신호를 출력한다. 이 신호는 LM629 모터제어기에 전달되어 적분연산을 거쳐 실제의 모터 회전수와 회전수를 계산하는데 사용된다. 모터제어기에는 2개의 모터를 동시에 제어하기 위해 2개의 LM629 모터제어 전용 DSP칩이 내장되어 있고 이외에 24개의 디지털 입출력이 설치되어 있다. LM629는 모터의 회전위치는 물론 속도와 가속도를 사용자가 원하는 대로 정확히 제어하도록 프로그램 되어 있고, 모터제어기의 현재상태를 제공하여 사용자가 쉽게 운전상태를 파악할 수 있는 환경을 마련한다. LM629의 Control Parameters에 사용되는 비례제어 이득(k_p), 적분제어 이득(k_i) 및 미분제어 이득(k_d)은 아래의 수식에 적용되어 모터 구동신호를 생성한다.

$$u(n) = k_p e(n) + k_i \sum_{N=0}^n e(n) + k_d [e(n) - e(n-1)]$$

마스터 제어유닛 프로그램에서 구현된 안내관 취급장비의 제어 및 감시 로직은 그림 4와 같다.

2.3 프로토타입 현장적용 시험

제작된 프로토타입 시스템은 고리 3호기의 핵연료 교체기간 중 현장 안내관 인출 및 삽입작업에 적용하여 설계된 대로 정확하게 동작하는 지를 확인하였으며, 실제 인출 및 삽입을 자동으로 수행하는 작업을 시연해 보임으로써 장비의 유용성을 확인하였다. 시연 중에 참관한 관계자들로부터 개

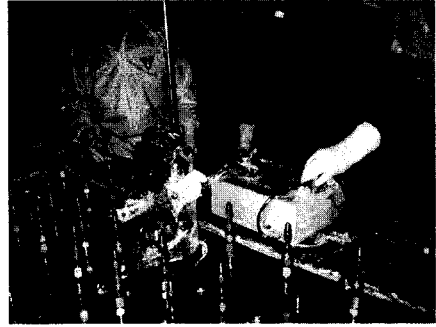


그림 5. 고리 3호기에 적용된 프로토타입 시스템

선 요구사항을 수렴하였고 2차년도에 제작예정인 시스템 시제품에 반영할 예정이다. 그림 5는 고리 3호기 안내관 삽입 작업에 적용된 프로토타입 시스템을 보이고 있다.

3. 결 론

검출기 안내관 취급기구의 설계에는 Collet Chuck 방식의 안내관 파지기구, 공압 Diaphragm 방식의 안내관 취급기구, Single Winch Roller 방식의 안내관 취급기구 및 Double Winch Roller 방식의 안내관 취급기구 등이 고려되었으나, 검토 후 Double Winch Roller 방식을 채택하여 프로토타입을 제작하고 시험하였다. 제어 및 감시장치는 크게 안내관 취급기구를 제어 및 감시하는 마스터 제어유닛, 마스터 제어유닛을 무선으로 원격제어하며 안내관에 가해지는 힘의 분포를 감시 및 관리하는 원격제어 및 감시 장치(PDA)와 밀봉 테이블 상부에 인출된 안내관을 고정시키는 목적으로 설치된 안내관 거치대에 위치하는 로컬 제어유닛으로 구성되고, 이들은 무선 또는 제어 케이블에 의해 정보를 교환하도록 하여 사용자 편의성을 향상시켰다. 제작된 프로토타입 시스템은 검출기 안내관에 50kgf의 힘을 인가할 수 있으며 최대 600 cm/초의 속도를 낼 수 있다. 이 프로토타입 시스템은 고리 3호기의 핵연료 교체기간 중 현장 안내관 인출 및 삽입 작업에 적용하여 설계된 대로 정확하게 동작하는지를 확인하였으며, 실제 인출 및 삽입을 자동으로 수행하는 작업을 시연해 보임으로써 장비의 유용성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업에 의하여 개발 중인 노내 핵계측 안내관 인출 및 삽입용 자동화 시스템 개발에 관한 기술개발결과임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- [1] 고리 1호기 노내 중성자 검출기 구동설비 국산화 개발, 최종보고서 전력연구원, 2003.
- [2] 고리 1호기 최종안전분석보고서(FSAR; Final Safety Analysis Report).
- [3] Technical Manual for In-Core Instrumentation Kori No.1 Westinghouse Nuclear Energy Systems.
- [4] 원전 노내 핵계측 계통 기술교류회 발표자료, 전력연구원, 2005.