

PC기반의 제어봉 구동장치의 신뢰성 시험장치 개발

•권석근* , 이운근* , 김종선* , 손창호*
*삼창기업(주) 제어기술연구소

Development of a CEDM tester using PC

•S. G. Kwon*, U. K. Yi*, J. S. Kim*
*Samchang Enterprize Co., Ltd.

Abstract - 원자력발전에 사용되는 모든 제어시스템은 성능뿐만 아니라 신뢰성과 안전성이 매우 중요시되고 있다. 국내에서 제작되고 있는 경수로형 원자력발전소 제어봉 구동장치 또한 이런 성능시험 및 평가를 위해 전량 외국에서 이루어져 왔으며, 많은 경제적 비용이 지불되어 왔다. 국내에서 제어봉 구동장치의 자체 성능시험을 위해 가동중인 원자력발전소의 시스템과 동일한 조건에서 시험할 수 있는 시험장치를 개발하였다. 시험장비를 국산화함으로써 비용절감과 다양한 실험으로 우수한 제품개발에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

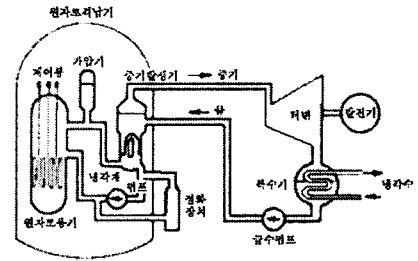


그림 1. 가압경수형 원자로(PWR)

1. 서 론

원자로를 제어하는데 가장 중요한 것은 중성자수를 조절하는 것이다. 제어봉 장치는 원자로 제어시스템의 일부로서 모터에 의해 제어봉의 위치를 조절하여 중성자수를 조절함으로써 원자로 출력을 제어하는 것이다. 정상 운전 중 제어봉은 운전모드의 선택에 따라 원자로 제어시스템의 제어명령을 받아 자동으로 운전되며 운전원의 수동 조작에 의해서도 운전이 가능하도록 되어 있다. 제어봉은 출력변환이 요구될 때 노심의 반응도를 변화시키고 노심의 임계상태를 유지시킨다. 제어봉은 필요에 따라 완전히 혹은 부분적으로 노심 내에 삽입될 수 있으며, 원자로 제어시스템을 이용하여 비상정지가 요구될 때는 드라이벨 하부에 설치된 전자기단속기의 전원을 차단시켜 중력에 의한 신속한 낙하가 이루어지도록 되어 있다.

원자력발전에 사용되는 모든 제어시스템은 성능뿐만 아니라 신뢰성과 안전성이 매우 중요시되고 있다. 국내에서 제작되고 있는 경수로형 원자력발전소 제어봉 구동장치 또한 이런 성능시험 및 평가를 위해 전량 외국에서 이루어져 왔으며, 많은 경제적 비용이 지불되어 왔다. 원자력 발전제어시스템 분야에 많은 부분에서 국산화가 되었으며, 현재에도 계속적인 개발이 이루어지고 있다. 따라서 국내에서 제어봉 구동장치의 자체 성능시험을 위해 가동중인 원자력발전소의 시스템과 동일한 조건에서 시험할 수 있는 시험장치를 개발하였다. 시험장비를 국산화함으로써 비용절감과 다양한 실험으로 우수한 제품개발에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본 론

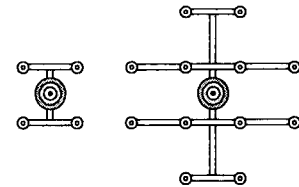
2.1 가동중인 원자로의 구성

가압경수형 원자로(PWR)는 원래 원자력 합성용으로 미국의 웨스팅 하우스사(Westing House Co.)가 최초로 개발한 것으로서, 현재 세계적으로 가장 많이 보급되어 있으며 우리 나라에서도 고리 원자력을 비롯하여 영광, 울진 등 여러 곳에서 운전 중에 있는 원자로형이다. 원자로는 아래 그림에서 보는 바와 같이 원자로 용기와 그 속에 수용될 노심, 노내 구조물, 제어봉 및 구동 장치로 구성되고 있다. [1]

2.1.1 원자로

원자로용기는 핵연료를 장전하여 연쇄 핵반응이 발생되는 장소로서 방사선의 영향과 고온고압의 상태에서 견디도록 설계되었다. 노심은 177개의 핵연료집합체와 73개의 제어봉 집합체로 구성되어, 등가직경 123인치, 길이 150인치인 원통형으로 설치되었다.

2.1.2 제어봉 집합체와 제어봉 구동장치



(a) 4개봉 (b) 12개봉
그림 2. 제어봉집합체

제어봉 집합체는 총 73개가 사용되고 있으며, 그중 32개는 12개봉 전강도 제어봉 집합체이고 33개는 4개봉 전강도 제어봉 집합체이며, 나머지 8개는 4개봉 부분강도 집합체이다.

제어봉 집합체마다 제어봉 집합체 구동장치가 하나씩 있는데, 제어봉 집합체 구동장치는 제어봉 연장축을 통해서 제어봉을 삽입, 인출할 수 있도록 코일이 4개, 결쇠가 2개 있는 자력 구동장치이다.

제어봉 구동장치는 자기-잭(magnetic jack) 유형의 구동장치로서 제어봉 집합체를 노심 내에서 수직 이동 및 위치토록 하는데 사용되며, 각 구동장치는 작동신호에 따라 153인치 노심 길이 범위의 어떠한 위치에서도 인출, 삽입, 유지 또는 낙하시킬 수 있다. 제어봉 구동장치는 원자로용기 헤드 위의 노출에 설치되며, 상하부 제어봉 구동장치 압력하우징, 전동기장치, 코일스택 장치, 위치지시 스위치장치, 연장축 장치 등으로 구성되고, 구동력은 제어봉 구동장치 하우징을 둘러싼 코일스택 장치에 의해 공급된다. 2개의 위치지시 스위치는 상부압력 하우징 쉬라우드에 의해 지지되고, 제어봉 구동장치 압

력 하우징은 원자로 냉각재 압력계계의 일부로서 원자로 용기와 같은 내압조건이다.

가) 제어봉 구동장치 압력하우징

전동기 하우징용치와 상부 압력 하우징용치로 구성되며, 전동기 하우징 용치는 원자로용기 헤드노즐에 나사 체결과 용접밀봉으로 부착된다. 모든 제어봉 구동장치는 전동기 하우징 상단에서 구동하므로 정구적인 기기 보수 및 검사시 방해가 되지 않는 구조로 되어 있으며, 손상시 보수가 용이한 구조로 설계되어 있다.

나) 전동기

전동기는 전동기하우징 속에 정착되어 제어봉 집합체를 수직 이동시키는 역할을 하며, 래치 안내판과 상하부 래치들로 구성된다. 상하부 래치는 제어봉장치를 단계별로 작동시키는데 사용되고, 모든 제어봉 집합체를 이동시킬 필요가 없을 경우에는 상부래치가 현위치를 유지시킨다. 래치어동은 수직으로 상부 래치가 7/16인치, 하부 래치가 6/16인치 수직이동하며, 각각의 래치의 작동편차가 진행방향의 반대방향으로 1/32인치 이동하게 된다. 따라서 제어봉 집합체의 한 스텝당 이동거리는 3/4인치이며, 총 200스텝을 이동하여 150인치까지 이동된다.[2]

다) 코일스택용치

전동기하우징용치 외부에 설치된 4개의 큰 직류 자기 코일로 구성되며 이 코일들이 제어봉 집합체 연장축에 접속되어, 구동하도록 래치들에게 자기력을 공급한다. 자기코일에 공급되는 전원은 2대의 전동기발전기로부터 오며, 제어봉 구동장치 제어계통이 상하향 순차적 작동을 지시함으로써 정확한 제어봉 집합체 위치를 얻는다. 제어봉 집합체가 낙하되어 90% 삽입 시까지의 최대 낙하시간은 4.0초이다. 연료집합체 가장자리의 모퉁이에 있는 외곽의 4개 안내판 하단에는 구배가 저서 직경이 감소됨으로써 제어봉 낙하 끝지점에서 속도를 줄여 완충되도록 하였으며, 여기에 제어봉 집합체 거미발의 플린저(PLUNGER)와 스프링이 완충효과를 증대시킨다. 완전히 삽입될 경우에 제어봉 집합체는 상부 안내구조물 지지판에 놓여지게 된다.

라) 연장축용치

제어봉 구동장치와 제어봉 집합체를 연결시켜 주는 스테인레스강 봉으로서, 상단에는 위치지시스위치를 작동시키는 영구자석용치가 있고, 하단에는 제어봉 집합체에 연결되는 커플링장치가 있으며, 중앙부분은 구동축이라 불린다. 구동축은 203스테인레스강으로서 연장축에 나사와 핀으로 연결되고 주변에는 3/4인치 간격으로 노치(NOTCH)가 가공되어 제어봉 구동장치에 연결이 되도록 하였다. 상단의 자석용치는 하우징, 자석, 플러거 등으로 구성되며, 2개의 원통형자석이 사용된다. 이 자석용치가 위치지시스위치를 작동시키며, 하우징 바닥에 플러거로써 설치된다.

마) 제어봉 집합체 위치측정

제어봉 위치를 나타내기 위해서 위치지시스위치가 제어봉마다 2개씩 있는데 여기서 제어봉 위치에 비례하는 출력전압을 발생시킨다. 이 리드스위치 어셈블리는 제어봉 연장축 꼭대기에 있는 영구자석이 움직일 때 리드스위치를 동작할 수 있는 위치에 설치되어 있다. 위치지시스위치 집합체는 자기적으로 작동하는 직렬로 된 리드스위치로 구성되어 있으며, 전압분배기에는 정밀 저항기가 결선되어 있다.

제어봉 집합체 연장축에 붙어 있는 자석은 인접한 리드스위치를 작동하여 제어봉 집합체 위치에 비례하는 전압을 형성한다. 두 위치지시스위치 집합체와 결선은 각각 물리적, 전기적으로 분리되어 있다.

2.2 제어봉 구동모터 시험장치 개발

2.2.1 시스템 구성

두 개의 그룹을 동시에 시험할 수 있는 시험장치는 3개의 21인치 캐비닛(논리캐비닛, 제어캐비닛, 파워캐비닛)으로 구성되어 있다.

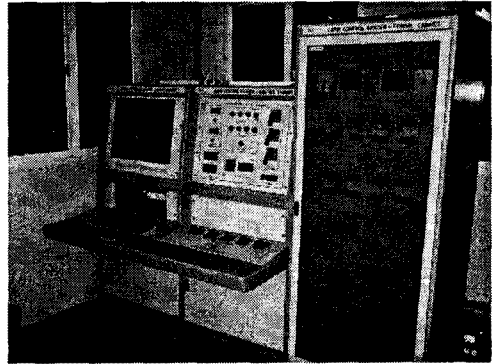


그림 3. 시스템 구성

논리 캐비닛은 산업용 컴퓨터와 데이터취득장치로 구성되어 있으며, 원격제어 및 데이터 취득을 위한 프로그램이 있다. 특성을 분석하기 위해 코일스택에 흐르는 전류파형을 1초에 1000개의 데이터를 취득하여 저장하고 위치지시스위치의 위치를 인식하여 화면에 표시해 준다.

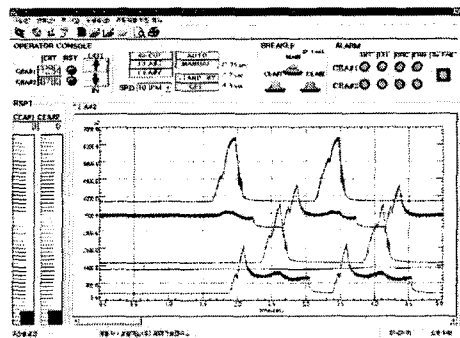


그림 4. 시험 프로그램

파워 캐비닛은 3상 240VAC 전원을 SCR 전원 스위치로 제어봉 구동장치에 알맞게 DC전류로 바꾸어 제어봉 구동장치 코일을 순서대로 여자 시킴으로써 제어봉을 움직인다.

제어 캐비닛은 240VAC에서 제로크로싱을 검출하여 저전압과 고전압 발생을 위한 위상을 결정하고, 제어봉 구동장치의 코일에 가해지는 구동신호를 제어하기 위해 제어봉이 삽입, 인출되도록 미리 계획된 순서에 따라 각 코일의 전압을 제어한다. 코일드라이버 제어는 여러 논신호와 비교 후 SCR 제어신호를 발생시킨다.

2.2.2 시스템의 기능

제어봉 구동장치 제어계통은 구동 계단 사이클을 만들고, 삽입 및 인출 단계절차에 의해 제어봉이 구동되는데 모든 코일에 전원이 상실되면 제어봉 구동장치와 연장축으로 연결된 모든 제어봉들이 트립된다.

제어봉이 삽입 및 인출되는 것은 미리 계획된 순서에 따라 각 코일의 전압을 조정함으로써 이루어지는데 각 코일에는 3가지 계획된 전압이 있다.

- 고전압
- 저전압
- 0전압

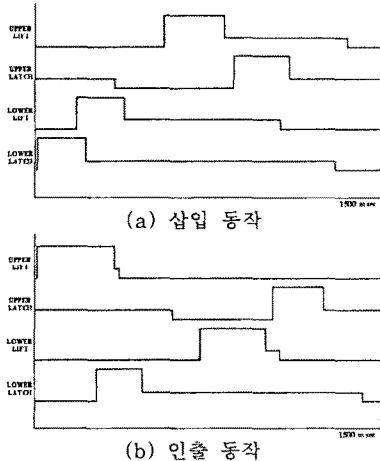


그림 5. 삽입 및 인출을 위한 제어 신호

시험을 위한 주요 기능은 아래와 같다.

- 1) 수동 운전
시험원이 어떤 제어봉 하나를 선택하여 개별로 삽입 및 인출이 가능하도록 되어있다. 또한 그룹으로 운전이 가능하다. 제어 스위치들을 와 조이스틱을 사용하여 지정된 속도로 한 스텝 단위로 운전할 수 있다.
- 2) 자동 운전
시험원이 어떤 제어봉 하나를 선택하거나 그룹을 선택한 후 운전 시작을 하면 제어 케비닛의 제어 프로그램에 의한 삽입, 인출이 자동으로 반복 연속 운전이 가능하도록 되어있다.
- 3) 대기모드(Standby Mode)
시험원에 의한 수동명령으로 모든 제어봉 운동을 정지시킬 수 있다.
- 4) 강제 트립
원자료가 트립되면 제어봉 구동장치 코일의 전원이 차단되어 중력에 의해 제어봉 집합체가 삽입된다. 기술서침서에서 요구하는 90%삽입에 대한 제어봉 낙하시간은 최대 4.0이다. 이 조건을 시험하기 위한 강제 전원 차단 스위치가 있으며, 트립에 의한 자유낙하 그래프를 분석할 수 있다.
- 5) 상하부 제한
총 200스텝을 이동하여 150인치 범위에서 삽입 및 인출 동작을 하도록 상부와 하부 제한 기능이 있다. 즉, 제어봉이 상부 끝에 도달하면 더 이상 올라가지 못하도록 해준다. 또한 하부 끝에 도달하면 더 이상 내려가지 못하도록 해준다

2.2.3 결과 및 고찰

제어봉 구동장치의 동작특성과 신뢰성을 검증하기 위하여 개발된 시스템을 사용하여 분당 30인치의 속도로 자동 운전 모드로 동작시켰을 때의 결과이다. 낙하된 위치인 초기위치에서 최초 전원을 투입하여 제어봉을 인

출 동작을 했을 때의 코일에 흐르는 전류파형을 보여주고 있다. 이 결과에서 1 스텝 동작 시간이 1500msec로 계획된 순서에 따라 정확하게 동작하는 것을 확인 할 수 있었고, 또한 각 코일에 흐르는 전류 파형에서 구동 모터의 동작과 래치의 동작이 정상적으로 작동됨을 분석할 수 있다.

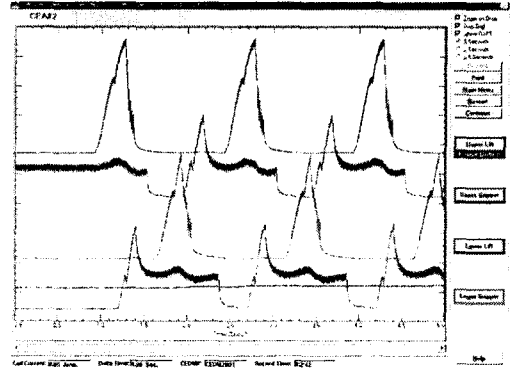


그림 6. 인출 시험

아래 그림은 상부에서 트립시 자유낙하 특성을 분석하기 위해 전원 차단 스위치를 동작 시켜올 때의 그래프를 보여주고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 낙하조건인 4 초 이내에 낙하되는 것을 확인할 수 있으며, 또한 낙하시 위치지시스위치의 진동에 의한 신호까지 정확하게 분석할 수 있음을 알 수 있다.

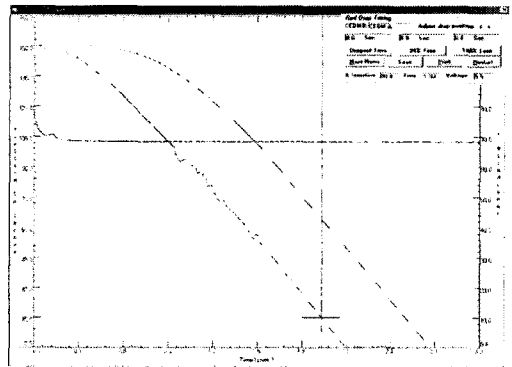


그림 7. 강제 트립 시험

3. 결 론

본 논문에서는 제어봉 구동장치의 시험을 위한 장치를 개발하였다. 개발된 시험장치가 현장시험에서 확인된 것과 같이 제어봉 구동장치의 동작특성과 신뢰성 시험에 적합한 것을 알 수 있었다. 또한 발전소와 같은 조건에서 시험을 하였으므로, 가동원전의 제어계통과 연계에 필요한 논리제어를 추가한다면 원전에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국원자력연구소, "한국형 표준원전 계통실무", 1996
 [2] CE Power System, "Technical manual for control element drive mechanism control system", 1995.