

SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계

Conceptual Design of Control Rod Position Indicator for SMART CEDM

유제용, 허형, 김지호, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

일체형원자로 SMART는 무봉산 운전요건에 따라 제어봉만으로 노심 반응도를 조절해야 하므로 제어봉의 위치정보는 노심보호계통 설계에 매우 중요하다. 따라서 신뢰성이 우수하고 정확도가 높은 위치지시기의 개발이 필요하다. 이를 위하여 기존 원자로에서 채택하고 있는 위치지시기에 대한 기술분석을 수행하였다. 기존 상용 및 연구용 원자로에 적용된 제어봉 위치지시기의 작동원리 및 설계사양의 분석을 통하여 도출된 안전요건과 핵심기술을 바탕으로 일체형원자로 SMART에 사용될 제어봉 위치지시기의 개념설계를 수행하였다. 또한 개념설계된 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기의 설계와 개념 성립성을 기존 원자로의 위치지시기와 비교평가 하였다.

Abstract

The reliability and accuracy of the information on control rod position are very important to the reactor safety and the design of the core protection system. In this study, a thorough investigation on the regulatory requirements regarding the control rod position indication system and their actual implementation in the existing nuclear plants in Korea was performed first. A conceptual design of the control rod position indication system for the CEDM on the integral reactor SMART was developed based on the requirements identified through the investigation. The feasibility of the conceptual design was evaluated further by comparing with the existing systems currently in operation.

1. 서론

전세계적으로 신형원자로 개발의 기술적 중점은 원자로의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 고유 및 피동 안전개념 등의 신기술 접목으로 인위적 조치 없이 자동적으로 사고에 대처할 수 있는 사고방지 능력 제고이다. 1980년대부터 원자력기술 자립을 목표로 원자로 계통설계, 기기설계 등 많은 분야의 기술이 축적되어 왔다. 현시점은 상용로에서 축적된 기술을 바탕으로

으로 독자적인 고유모델의 개발로 나아가는 단계라고 할 수 있다. 현재 세계적으로는 모든 주기기를 원자로 내에 장착하여 안전성 및 신뢰성을 획기적으로 향상시킨 개념인 일체형원자로를 개발하는 추세이다. 원자력 선진국에서 일체형원자로를 개발하는 주된 이유는 모든 주기기가 원자로용기 안에 배치되므로 원자로의 안전성을 한층 높일 수 있기 때문이다.

현재 개발중인 중소형 일체형원자로 SMART에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 한다. 또한 위치지시기에서 나오는 안전 계통의 신호는 높은 신뢰성과 정확성을 가져야 한다. 일체형원자로 SMART에서 필요로 하는 위치지시기는 기존 상용로에서 쓰였던 위치지시기 형태에서 한 단계 더 진보된 성능을 가지도록 설계 제작되어야 한다. 본 연구에서는 우선 관련요건을 정확히 파악하고 이를 근간으로 SMART 제어봉 위치지시기의 개념설계를 수행하였다.

2 안전계통의 신호측정 요건

원자력 발전소에 대해 미국 연방법(10CFR50, App.A)에서 규정한 일반 설계 기준(GDC, General Design Criteria), IEEE (Institute for Electrical and Electronics Engineers), 그리고 USNRC의 RG(Regulatory Guide)에서 정한 전자부품 및 측정장비에 대한 표준 사항들 중, 안전계통 신호를 제공하는 위치지시기에 해당하는 조항을 정리하면 다음과 같다.

(1) GDC (General Design Criteria)

- . Criterion 13 - Instrumentation and Controls
- . Criterion 17 - Electric Power Systems
- . Criterion 20 - Protection System Function
- . Criterion 21 - Protection System Reliability and Testability
- . Criterion 22 - Protection Systems Independence
- . Criterion 23 - Protection Systems Failure Mode
- . Criterion 24 - Separation of protection and control systems

(2) IEEE Standard

- . IEEE 384 (ANSI N41.14)
Criteria for Separation of Class 1E Equipment and Circuits, Section 4.5
- . IEEE 279 (ANSI N42.7)
Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations,
Section 4.6, Section 4.8
- . IEEE 603, Section 6.4
- . IEEE 7-4.3.2, Section 6

(3) USNRC Regulatory Guide

- . RG 1.75 C.16 - Physical Independence of Electric Systems

(4) NUREG 0800, Standard Review Plan, App. 7.1-B and 7.1-C

상기 관련 규정에서 공통으로 일관되게 요구하는 것은 제어봉의 실제 위치를 측정하기 위해서는 제어봉 구동 신호와는 별도로 위치지시기를 통해 측정된 신호를 이용해야 한다는 것과 안전계통의 위치정보는 제어계통의 신호와 물리적 전기적으로 독립되어야 하고 측정된 위치 신호도 만일의 고장에 대비하여 신호 채널이 다양화되어야 한다는 것이다.

3. 제어봉 위치지시기의 기술분석

국내는 현재 발전용 원자로로서 미국 Westinghouse의 가압경수형 원자로(PWR) 6기와 프랑스 프라마툼의 PWR 2기, 미국 ABB-CE사의 PWR 3기가 가동중이며 캐나다의 CANDU형 원자로 3기가 또한 가동 중에 있다. 연구용 원자로로는 미국 General Atomic사의 TRIGA형 원자로 2기 및 한국원자력연구소가 설계 건설한 HANARO가 현재 운전 중에 있다. 이들 원자로에 사용되고 있는 제어봉 위치지시기는 구조 및 구동원리가 원자로 노형별로 서로 다르며, 모두 외국에서 도입되었으므로 국내 개발품은 전혀 없는 상태이다. 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기를 설계개발하기 위하여 기존 원자로 위치지시기의 특성과 성능을 조사하였다.

(1) 디지털 제어봉 위치지시기

디지털 제어봉 위치지시기(Digital Rod Position Indicator)는 제어봉 연장봉에 설치된 영구 자석이 압력용기 외벽에 감긴 코일 안에 위치하게 되면 자기장의 변화를 일으켜 코일의 리액턴스(Reactance)를 증가시키는 원리를 이용한 위치지시기로서 웨스팅하우스에서 설계한 고리 원자력발전소의 제어봉 위치지시기로 사용하고 있다. 제어봉의 위치는 밀봉관 외측에 원형으로 감겨있는 검출코일에 의해 감지되어 자료처리함에서 처리된 다음 주제어반 지시함에 보내진다. 이 신호는 주제어반 지시함에서 도해적으로 위치를 지시하며 또한 소내 전산기로도 제공이 된다. 제어봉 구동장치 상부 하우스 외부에 3.75인치 간격으로 42개의 코일봉치가 감겨 있으며 디지털 제어봉의 위치지시기 계통도는 그림 1과 같다.[1-4] 디지털 제어봉 위치지시기(DRPI)는 각 제어봉마다 전기적으로 독립된 검출기가 2채널(그룹A, 그룹B)로 제어봉 위치를 제공한다. 한 검출기가 고장이 나더라도 다른 검출기에 의해 제어봉 위치를 계속 지시하게 된다. 이와 같이 코일을 전기적으로 독립된 그룹으로 양분하는 것은 어떤 하나의 코일 또는 코일 그룹의 고장 시에도 제어봉의 위치신호 상실을 방지하기 위함이다. 그러나 이때 정확도는 반으로 떨어진다. 42개의 코일은 그룹 A 및 그룹 B로 나누어지며 코일번호는 아래에서 위쪽으로 A1, B1, A2, B2, ...로 지정된다. 각 그룹의 코일들에는 각각 병렬로 6VAC 정 전압원으로부터 AC전류가 50/60Hz 저주파수로 공급된다. 저주파수를 사용하는 것은 코일에 의해 발생된 전자속이 두꺼운 상부 하우스를 통과할 수 있게 하기 위함이다.

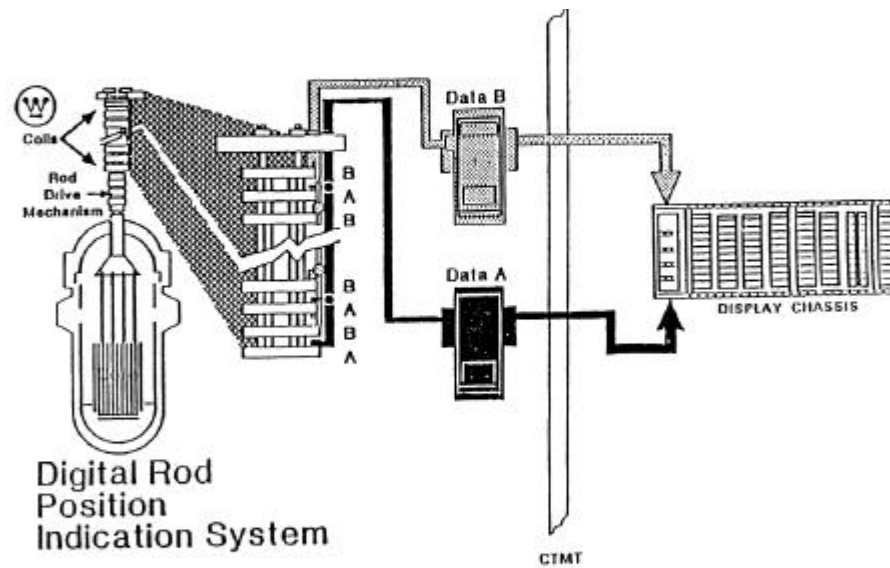


그림 1 디지털 위치지시기의 전체 개략도

(2) 리드스위치를 사용한 제어봉 위치지시기

영광 3, 4호기 이후에 국내에 건설된 ABB-CE형 상용로에서 사용하는 위치지시기 형태는 부피가 작고 위치지시 신호선 수가 적은 리드스위치(Reed Switch) 센서를 이용한 위치지시기(Reed Switch Position Transmitter)가 대부분이다. 측정원리는 자석에 의해 만들어진 정자계를 검출의 매체로 하여, 검출체의 위치에 따라 변화하는 자계를 검출 소자인 리드 스위치로 검출하는 방식이다. 이 방식은 무접촉 검출이며 검출체에 반력이 가해지지 않으며 스위치의 접촉을 유도하는 기계적 장치를 가지고 있지 않아 고빈도, 고속 응답이 가능하고 비교적 수명이 길다. 리드스위치의 접촉 형태는 평상시 자기장이 없을 때에는 리드가 단락 되어 있다가 자기장의 영향이 있으면 리드가 접촉하는 형태이다. 리드 스위치의 구조는 그림 2와 같다. 리드스위치는 한 쌍의 유연한 자성체로 이루어져 있으며 불활성(Inert) 가스로 채워진 유리관 속에 밀폐되어 있다. 두 리드는 유리관 속에서 약간 겹쳐져 있으나 간격을 두고 엇갈려 있다. [5-8]

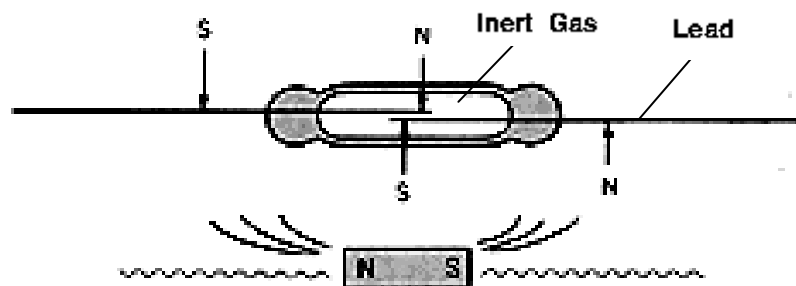


그림 2 리드 스위치의 리드의 자기화

ABB-CE형 상용원자로의 위치지시기는 직렬로 연결된 2개의 리드스위치가 한 쌍을 이

론 104 스텝으로 구성되어 있다. 제어봉 구동축의 상단에 N-S극으로 이루어진 영구자석을 설치하여 제어봉이 상하로 움직일 때 영구자석도 같이 움직인다. 이때 영구자석이 위치하는 지점에 설치된 리드 스위치의 리드는 접촉을 하게 되어 회로가 닫히게 된다. 리드스위치를 이용한 위치지시기는 제어봉 구동축을 둘러싸고 있는 상부 하우징의 바깥에 설치되는데 안쪽의 영구자석의 자기장을 최대한 이용하기 위해서 위치지시기를 상부 하우징에 최대한 근접시킨다. 수십 개의 리드스위치를 연결하기 위해서 얇은 비자성체 판 위에 리드스위치를 배열하고 뒷면에는 각 리드스위치의 리드와 저항을 연결한다. 이렇게 완성된 리드스위치 조립은 다시 가는 튜브에 장착되어 압력용기 외벽에 설치된다.

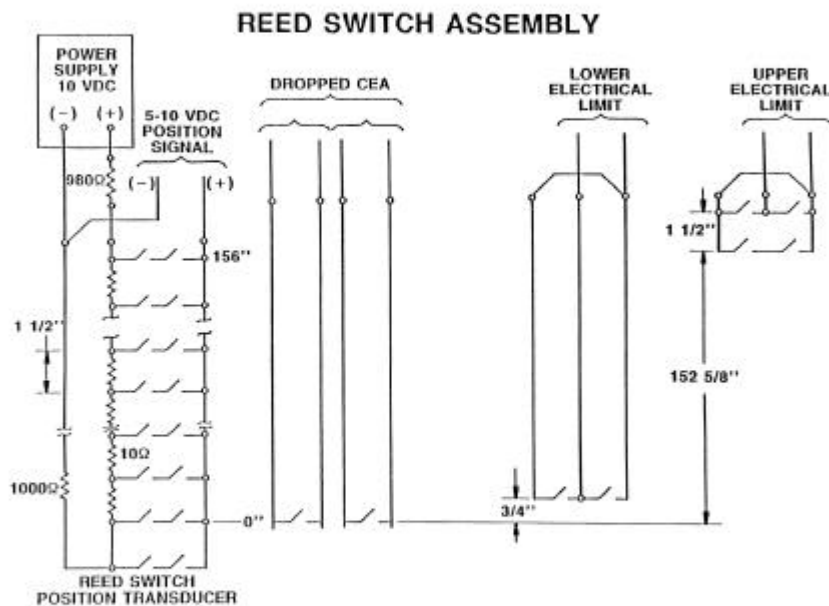


그림 3 RSPT의 전기적 동작회로

위치지시기 안에 설치된 리드스위치의 전기적 동작 회로는 그림 3과 같다. 위치지시기 안에 설치된 리드스위치는 영구자석의 위치에 따라 직렬로 연결된 저항들을 선택적으로 동작시키고 이에 따라 전압으로 출력되는 위치신호의 크기가 변화한다.

(3) 초음파센서를 이용한 제어봉 위치지시기

한국원자력연구소가 설계 건설한 연구용 원자로 HANARO에 장착된 위치지시기는 초음파 센서의 원리를 이용한 위치지시기로써 기존 상용 원자로에 적용된 위치지시기의 구조와 다르다. 교체용 초음파 센서로서 운전 환경이 열악한 상황에서도 사용이 가능하며 직선 변위측정 영역은 150mm에서 3200mm로 비교적 긴 거리까지 측정할 수 있고 절대 변위로 거리를 측정한다. 자석링으로 이루어진 마커(Marker)가 측정해야할 대상체에 붙어 대상체의 위치를 표시하고 마커의 위치를 초음파센서가 측정함으로써 측정물의 변위를 알아내게 된다.[9] 실제 초음파 신호의 전달 매개체는 고장력 스테인레스 튜브 안에 설치된 Nickel-Alloy 튜브이다. 신호발생기와 전기신호 처리기는 위치지시기의 끝단에 위치하여 설치가 용이하다.

그림 4는 연구용 원자로 HANARO에 설치된 초음파센서를 이용한 위치지시기이다. 측정하려는 대상의 위치를 나타내는 자석링은 제어봉 가동자와 연결되어 제어봉의 삽입 및 인출 시 제어봉 가동자와같이 움직인다. 자석링은 자기장의 경로를 대칭으로 만들기 위해 90°도 간격으로 위치한 4개의 영구 자석으로 이루어진다. 이 자석링은 제어봉 가동자에 연결되어 Nickel-Alloy 튜브의 종 방향으로 움직이고 이동 범위는 700mm이고 크기는 직경이 42mm이고 길이는 120mm이다. 그리고 Nickel-Alloy 튜브를 밀봉하고 있는 스테인레스 튜브는 직경이 10mm이고 길이는 700mm이다.

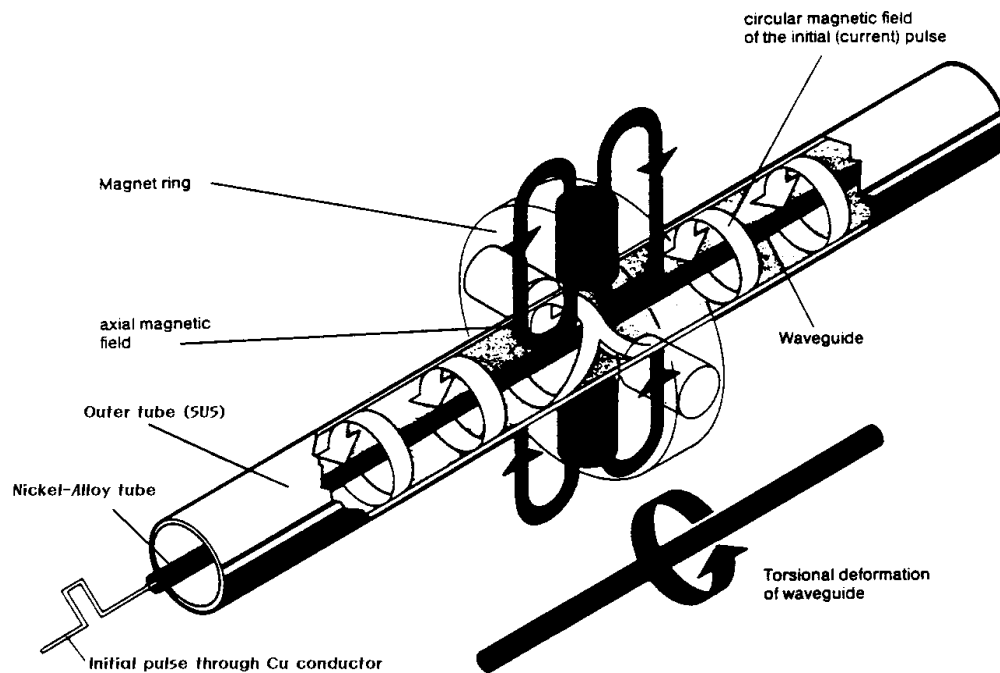


그림 4 초음파 센서를 이용한 위치지시기

위치지시기 상단에서 발생된 초음파 전류 펄스는 Nickel-Alloy 튜브내의 구리봉을 통해 전파되고 그 주위에는 원형 자기장(Circular magnetic field)이 형성된다. 이 자기장이 자석링의 자기장과 만나면 S자 형태의 자기장이 형성된다. 이 자기장은 자기신축(Magnetostriction)성 재료인 Nickel-Alloy 튜브의 크리스탈 구조의 변형을 일으킨다. 이 결과 자석링이 존재하는 Nickel-Alloy 튜브 부근에서는 기계적인 펄스인 비틀림 펄스가 발생되는데 이 펄스의 주파수도 초음파 영역에 있고 진행방향은 Nickel-Alloy 튜브의 양단으로 전파된다. 자석링이 존재하는 Nickel-Alloy 튜브 부근에서 발생된 비틀림 펄스는 초음파 수신기에 도달하게 되어 전기적 신호로 변환된다. 초음파 전류 펄스 발생기로부터 자석링까지의 거리는 초음파 전류 펄스를 발생시킨 시간과 비틀림 펄스가 초음파 수신기에 도달한 시간의 차를 계산하여 각 초음파의 속도를 고려하여 거리를 환산한다. 초음파 위치지시기에 인가되는 공급 전원은 24 VDC이고 측정거리를 나타내는 출력 신호는 전압과 전류 값으로 제공되는데 용도에 따라서 선택하여 이용할 수 있다.

4. 개념 설계된 SMART 제어봉 위치지시기

초우크 센서를 이용한 위치지시기는 그림 5에서 보는 바와 같이 가동축 상단에는 영구자석을 설치하고 제어봉과 함께 움직이는 이 영구자석의 위치를 상부압력용기 바깥쪽에 설치된 초우크센서에 의해서 감지하여 제어봉의 위치를 측정하는 원리이다. 영구자석이 제어봉과 함께 상하로 위치변위를 일으키면 상부압력용기 바깥쪽에 등간격으로 설치된 초우크들중 영구자석과 근접한 초우크내 전류변화가 발생되며, 이 정보를 이용하여 제어봉의 위치를 측정할 수 있다. 상부 압력용기 내부는 높은 온도의 일차수로 채워지게 되는 데, 이 높은 온도의 일차수에 견딜 수 있는 큐리온도점이 높고, 잔류자기와 보자력이 큰 내부식성 영구자석을 사용해야 한다. 그리고 자력선방향이 내부벽 측에 수직으로 충분히 통과하도록 하여 초우크내 쇠교자속을 변화시킬 수 있도록 설계하여야 한다. [10]

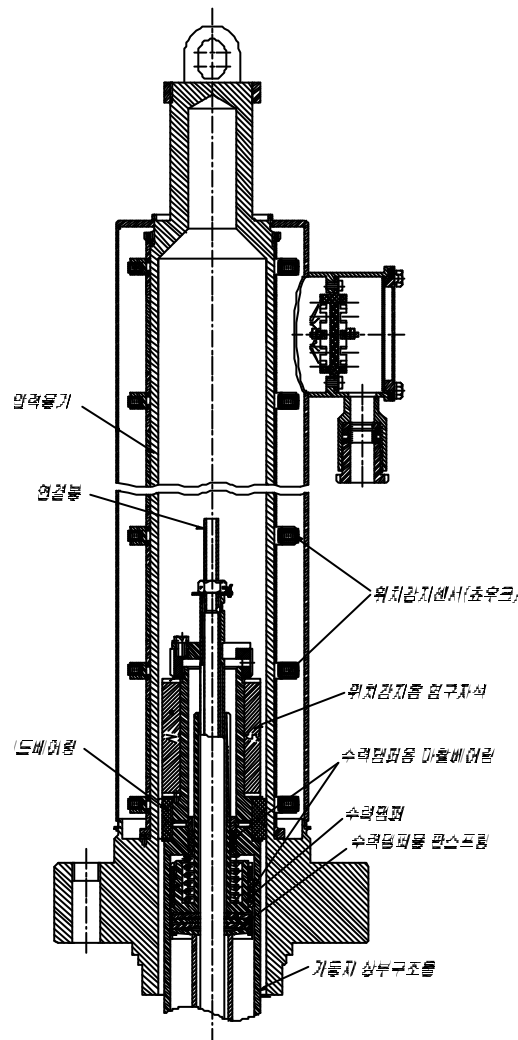


그림 5 개념 설계된 SMART 제어봉 위치지시기

초우크 센서는 그림 6에서 보는 바와 같이 Permalloy로 된 원환형 코어를 알루미늄으로 케이싱한 형태이며 그 위를 90° 간격으로 연자기철(MagnetoSoft Steel)로 된 4개의 자로 제공용 소켓(Shoes)과 이들 사이에 4개의 독립된 권선을 설치하여 하나는 예비센서로 사용하고 다른 세 개의 센서에서 얻은 신호를 분석하여 위치를 감지하도록 설계한다.

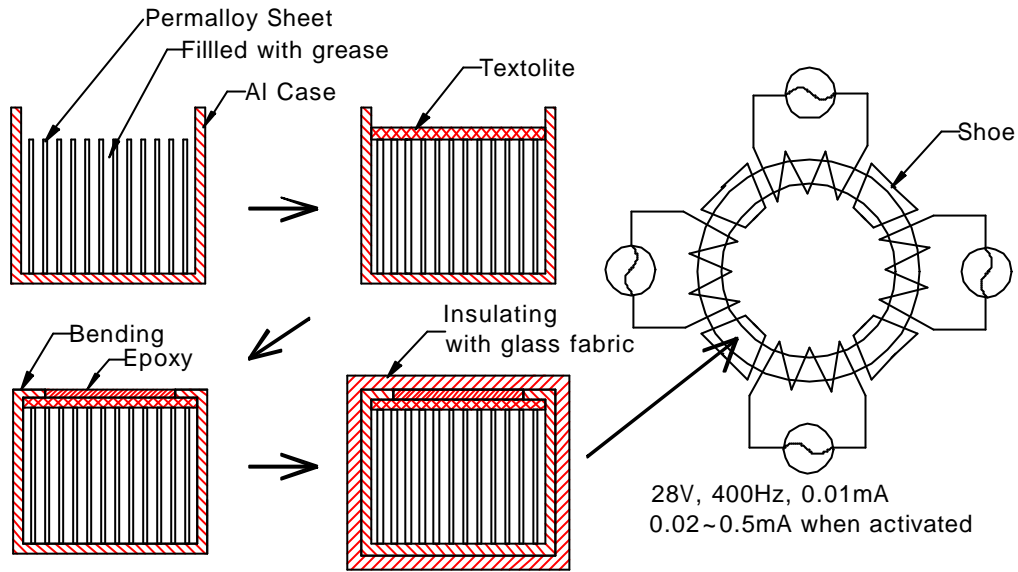


그림 6 초우크 센서의 제작과정

초우크는 비자성체로 된 압력용기 외벽면에 설치되므로 코어재료로 투자율이 높은 78.5% Ni합금인 Permalloy를 사용하여 상부 압력용기 벽면에 수직인 방향의 자력선을 충분히 감지할 수 있도록 설계되어야 한다. 이 초우크는 압력용기 내부의 영구자석의 움직임을 감지해야 하는데 자력선이 두꺼운 압력용기 비자성체를 통과하므로 감도를 좋게 하기 위하여 Permalloy 코어를 사용한다. 초우크센서의 내부 Permalloy 코어가 있는 부분은 진동에 의한 Permalloy의 손상을 방지하기 위하여 grease로 채운다. 측정원리는 영구자석이 상하로 위치변위를 일으키며 접근할 때 해당 초우크내 쇠교자속이 변화되며 그 결과로 권선에 흐르는 전류가 변화된다. 초우크 출력단에 연결된 전류계는 영구자석의 자력선 도움이 없을 때 전류값은 최대를 가리키며, 초우크의 코어가 완전히 포화될 때 전류값은 최소를 가리키게 된다. 초우크사이의 거리, 영구자석과 초우크간의 거리, 영구자석의 치수 등의 특성은 영구자석이 초우크사이 대칭위치에 있을 때 유지되는 전류값이 같다는 방법을 이용하여 선택된다. 측정은 Core에 자기력을 인가하면서 인가된 전압 파형과 전류 파형을 관찰함으로써 이루어진다. 즉 제어봉 상단에 부착된 영구자석이 Core안에 들어오면 외부자기장(Permanent Magnet에 의한 dc-bias field)이 인가되고, 이때 core의 자기이력곡선의 비대칭에 의한 전류의 파형의 변화가 발생하게 된다. 이 변화된 전류 파형을 감지함으로써 현재 제어봉의 위치를 알 수 있다. 즉 Permalloy의 B-H loop에서 포화(Saturation)영역

이하에서는 relative permeability($\frac{dB}{dH}$)가 크므로 인덕턴스가 커지게 되고, 포화영역에서는 relative permeability가 1이 되므로 coil 자체의 저항만이 작용하게 되어 전류의 크기가 변화하게 된다.

즉, 환상코일의 자기 인덕턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$L = \frac{\mu AN^2}{l}$$

단, L : 자기 인덕턴스 (H), l : 코일길이 (m) (자로 길이), μ : 투자율

A : 코일 단면적 (m^2), N^2 : 코일 권수 (회)

환상 코일 내에 영구자석이 통과하면 투자율 μ 가 증가하여 자기 인덕턴스 L 이 증가하여 코일의 리액턴스 X_L 은

$$X_L = 2\pi fL$$

이므로 X_L 이 증가한다.[11] 따라서 전체적인 임피던스의 증가로 코일에 흐르는 전류는 작아지게 되며 초우크 코일에 인가한 기준 AC 정현파(28V, 400Hz)의 모양도 일그러지게 된다.

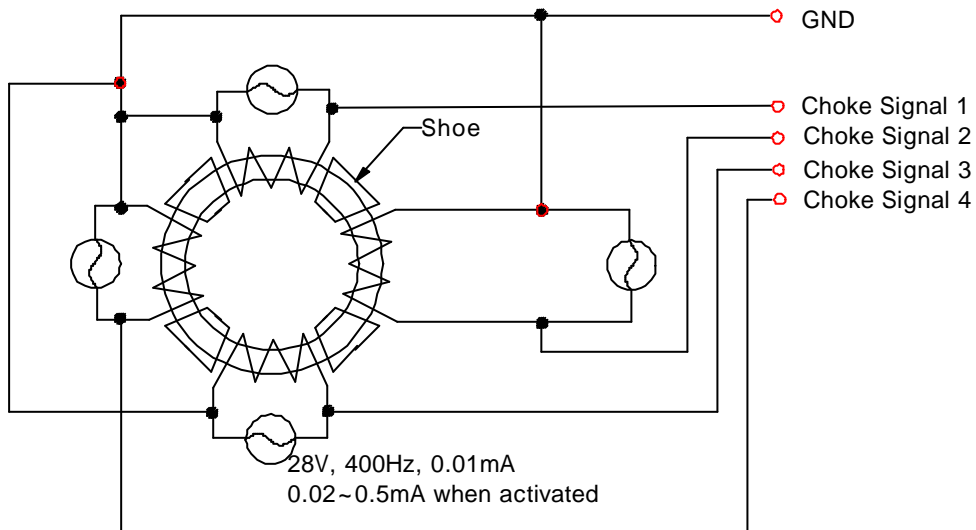


그림 7 초우크 센서의 신호선 결선

그림 7은 초우크 센서에서 위치 신호를 얻어내기 위한 결선도를 나타낸다. Permalloy로 된 원환

형 코어에 90° 간격으로 독립된 권선에서 접지(Ground)와 4개의 신호선 사이의 전압 신호를 얻는다. 전류와 전압신호는 상호 연관된 신호이므로 신호 처리에 유리한 전압 신호를 사용한다. 위치지시기에서 나온 신호는 아래 그림 8에서 나타낸 경로로 컨트롤 캐비닛에서 처리되어 LED로 표시된다.

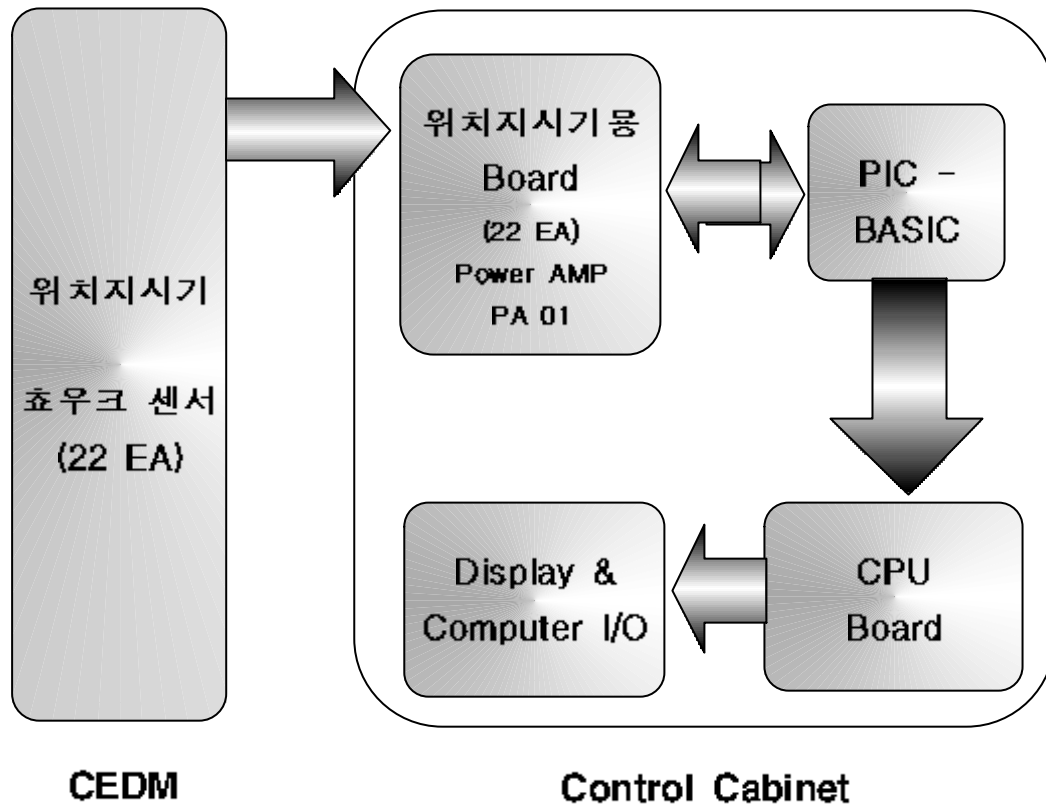


그림 8 위치지시기 신호 처리 개략도

위치지시기용 보드(Board)는 총 22개로 구성되고 각각의 보드는 22개의 쇼우크 센서에 각각 연결되어 있다. 한 개의 보드 안에는 쇼우크 센서로부터 나오는 4개의 신호선을 처리할 수 있는 독립적인 신호 증폭기와 회로로 구성되어 있다. 이 신호는 Visual-BASIC을 이용하여 신호처리되며 그 결과는 LED등의 표시 장치로 표시되고 중앙 처리장치와 연결된다. 기존 원자로의 제어봉 위치지시기와 개념설계중인 SMART 제어봉 위치지시기의 대표적 특성에 관해 표 1에 비교하였다. 표에서 나타난 다양한 형태의 위치지시기의 특성을 바탕으로 일체형원자로 SMART에 필요한 성능을 채택할 필요가 있다. 우선 디지털 위치지시기의 신호처리 과정 중 채널을 분리하는 기술을 채택할 만하고 RSPT에서는 간단하고 설치가 용이하다는 점과 적은 신호선 수가 주목할 만하다. 하지만 신호채널의 증가가 요구된다. 초음파센서를 이용한 위치지시기는 정밀한 측정결과와 손쉬운 설치를 제공하지만 자석링을 제어봉 가동자와 연결하여야만 하는데 이러한 설계는 가압경수로 원자로의 압력용기에 관통구를 내야만 하는 어려움이 따른다.

표 1 제어봉 위치지시기의 비교

	디지털 위치지시기 (Westinghouse)	리드센서 위치지시기 (ABB-CE)	초음파센서 위치지시기 (HANARO)	초우크센서 위치지시기 (SMART)
센서	Coil	Reed sensor	Ultrasonic sensor	Coke
스텝 수 간격	42개 9,525 cm	104개 3,81cm	분해능 : 1mm	22개 10cm
각 스텝당 채널수	2 (A, B상)	2	1	4
인가전압	6 VAC (60Hz)	10 VDC	24 VDC	28 VAC (400Hz)
CEDM당 선 개수	전원선 : 1 신호선 : 42	전원선 : 2 신호선 : 2	전원선 : 2 신호선 : 5	전원선 및 신호선 : 196
사용원전 및 목적	고리 1,2,3,4호기 영광 1,2호기 감시용	영광 3,4호기 보호용	하나로 보호용	SMART 보호용

5. 결론

일체형원자로 SMART에서는 대용량 상용원자로와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 미세 조정 기능을 보유한 제어봉 구동장치의 개발과 아울러 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발도 중요한 개발분야이다. 일체형원자로의 운전 특성을 고려하여 위치지시기는 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있어야 하며 더욱 강화된 안전계통 신호 요건을 준수해야 한다. 따라서 국내의 기술로 제어봉 위치지시기에 대한 개념 설계 제작을 수행하고 있지만 경우에 따라서는 본 보고서에서 분석된 기존 상용 원자로의 위치지시기의 특성과 성능을 일체형원자로 SMART의 위치지시기 설계에 과감하게 적용시킬 필요성이 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Systems Manual Pressurized Water Reactors Vol. 2, Inspection and Enforcement Training Center
- [2] 원자로 제어 및 보호설비 (계통-8), 한국전력공사, 원자력연수원, 1991
- [3] Final Safety Analysis report (KORI UNIT 2), Vol.2, 1989
- [4] Final Safety Analysis report (KORI UNIT 2), Vol.5, 1989
- [5] Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 1, Inspection and Enforcement Training Center
- [6] Systems Manual Pressurized Water Reactors Combustion Engineering design Vol. 2, Inspection and Enforcement Training Center
- [7] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999
- [8] Reed Electronics AG - Products Catalog, 1999
- [9] 백수현, 센서 핸드북, 도서출판 세화, 1990
- [10] 김종민외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험-KAERI/RR-1889/98-1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, 1999
- [11] Digital Rod Positioning System, Ford Instrument Co, 1957