

## 하나로 제어봉 신호처리장치 개발

### Development of Signal Processing Unit for HANARO Control Rod

김영기, 최영산, 박주문, 정환성, 김민진, 우종섭

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

캐나다 제작사에 의하여 공급된 하나로 제어봉 구동장치의 스텝핑 모터 신호처리장치는 제품의 생산 중단과 제작사의 미온적인 기술지원 등으로 인하여 하나로 운영에 많은 어려움을 안겨주었다. 기존 제품의 문제점을 해결하고 안정적인 원자로 운전을 보장하기 위하여, 순수한 국내기술로 새로운 개념의 신호처리장치 개발을 추진하게 되었다. 제어봉 신호처리장치의 중요성을 감안하여 장치의 국산화는 시제품 개발단계와 상용품 개발단계의 2단계로 분리 추진하였다. 시제품의 개발 과정과 단계별 성능시험 결과를 요약 기술하였고, 시제품을 성공으로 개발 완료한 뒤에 추진된 상용품의 제작과 성능시험 결과도 기술하였다.

#### Abstract

The signal processing unit for HANARO control rod supplied by a foreign company put difficulties on reactor operation due to obsolescence of the products and lukewarm technical support by the manufacturer. The development of the signal processing unit based on domestic technology has been carried out in order to solve the problems in issue and to ensure safe and reliable reactor operation. Considering the importance of its function, the development was proceeded by 2 separated steps. The developing process for the prototype and its verification function test are summarized. The status of the graded development of the real products to be used for operation are also briefly introduced.

#### 1.0 서론

하나로의 출력제어 기능을 수행하는 제어봉은 스텝핑 모터를 포함하는 기계적 구동장치와 제어 컴퓨터로부터의 명령신호를 처리하는 신호처리장치로 구분된다. 1995년 4월부터 현재까지 원자로 운전에서 사용 중인 제어봉 신호처리장치는 그림 1과 같이 구성되어 있다. 점선 속에 포함된 optical isolator와 J4001 카드는 제어봉 장치의 신뢰도와 안정성을 향상시키기 위하여 캐나다의 제어컴퓨터 제작사에 의하여 특수 설계, 제작되었고 나머지 장치들은 스텝핑 모터 제작사가 공급하는 상용품이다.[1] 스텝핑 모터를 제외하고는 그림 1의 모든 부품들이 이미 오래 전에 생산이 중단되어 운전 여유분의 확보가 불가능하고 또, 제작사의 미온적인 기술지원과 과도한 수리비용, 수리기간

의 장기화 등의 문제점으로 인하여 원자로 운전에 장애 요소가 되어 왔다. 특히, 운전 중 제어봉의 고장이 발생되었을 경우, 비정상 원인을 규명하기 위한 진단기능이 부족하여 문제 해결에 어려움을 겪고 있다. 기존 제품의 운전 여유분을 1~2 세트씩 보유하고 있으나 이들로써 원자로 수명기간을 채울 수 없다는 것은 명백하고 새로운 시스템으로의 대체가 불가피하게 요구되어, 운전 여유분의 안정적 공급과 원자로 운전의 신뢰성 확보를 위하여 순수한 국내기술로 제어봉 신호처리 장치의 설계, 제작 국산화를 착수하게 되었다.

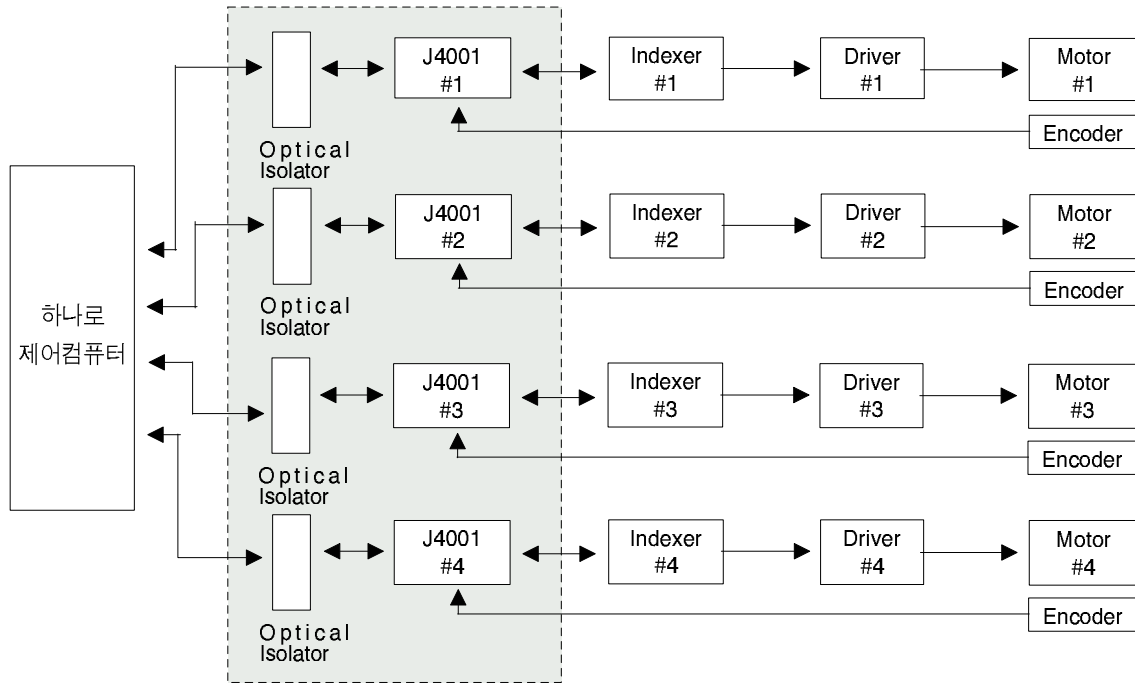


그림 1. 하나로 제어봉 신호처리 개념도

## 2.0 신호처리장치 설계 국산화

인터페이스 장치는 하나로 제어봉 구동을 위한 안전성 관련 중요 장치이므로 기능과 성능의 완벽한 검증 없이는 현장 적용이 불가능하다는 점을 감안하여 장치의 국산화는 2단계 전략으로 추진하기로 결정하였다. 먼저 1 세트의 시제품을 제작하여 충분한 성능시험을 실시하고 그 성능의 우수성이 확인된 후 실제 사용품을 제작하는 방식이었다. [2]

제어봉을 구성하고 있는 장치 중에서 국산화 대상 범위는 그림 2의 점선부분으로 표시된, 제어봉과 제어컴퓨터 사이의 모든 전자부품 및 케이블을 포함하였다. 국산화 대상이 아닌 제어봉 집합체와 제어 알고리즘은 현재의 개념을 그대로 유지하도록 하였다. 즉, 스텝핑 모터를 포함하여 제어봉의 기계적 구동장치는 설계변경 없이 그대로 사용하고 또, 제어컴퓨터의 소프트웨어 역시 현재의 제어 알고리즘을 그대로 사용하도록 하여 설계변경의 범위를 최소화하였다. 제어봉의 구동개념에 대한 설계변경은 없고 단지 구동신호처리를 담당하는 전자회로 부분만 새로운 디지털 개념의 장치로 대체하는 것이었다.

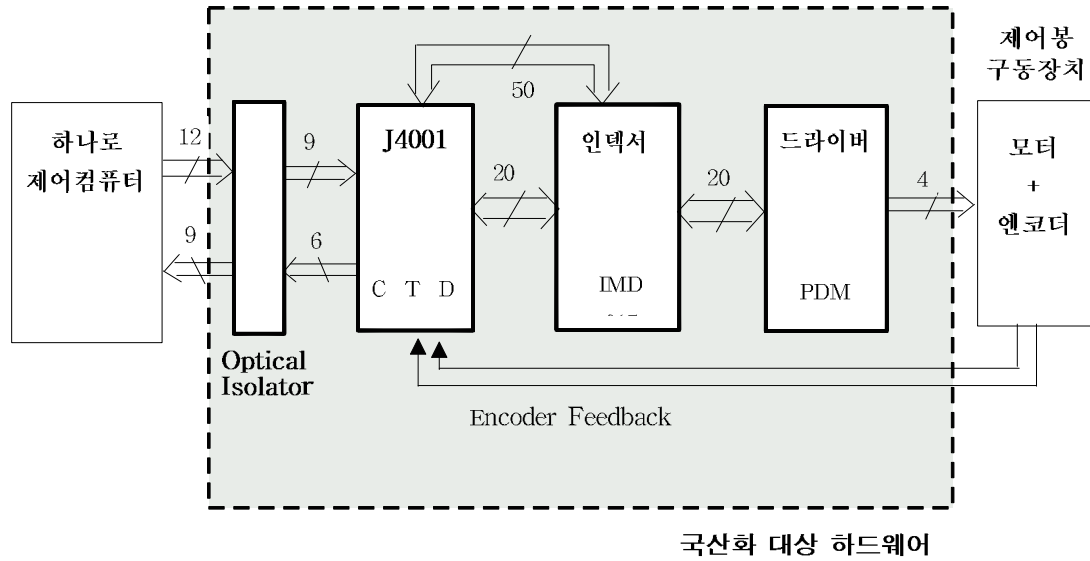


그림 2 제어봉 신호처리장치의 국산화 범위

앞서 언급한 바와 같이, 제어컴퓨터와 제어봉 구동장치 부분은 설계변경이 없으므로 기존에 포설되어 있는 신호선을 그대로 사용할 수 있도록 신호처리장치를 설계하였다. 신호처리장치로부터 입출력되는 신호선은 제어컴퓨터 출력신호, 제어컴퓨터 입력신호, 스텝핑 모터 제어신호, 엔코더 케환신호 등으로 구성된다. 신호처리장치의 기술사양과 설계기술현황을 요약하여 기술한다.

#### □ 타이밍 제어

하나로 제어컴퓨터는 200 msec마다 제어 알고리즘에 의하여 계산된 제어봉 구동 명령신호를 출력한다. 신호처리장치는 200 msec 내에 명령신호를 처리하고 명령과 실제 구동이 정상적으로 이루어졌는지를 판단하여 제어컴퓨터로 비정상 발생여부를 알려주어야 한다. 200msec 동안 신호처리장치가 수행하여야 하는 일을 타이밍 순서로 표현하면 그림 3과 같다.

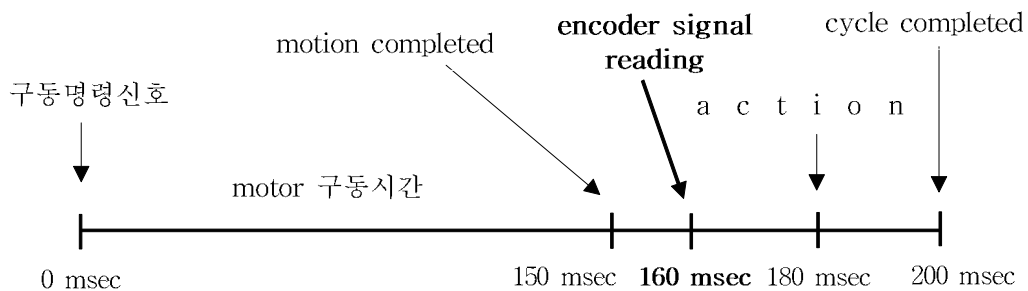


그림 3 신호처리장치의 타이밍 선도

#### □ 신호처리장치의 구성

신호처리장치는 모터 드라이버, 모터 콘트롤러, 입출력 모듈, 그리고 펄스 카운터 등으로 구성된다. 모터 콘트롤러는 스텝핑 모터를 구동하기 위한 각종 모드설정과 모터 구동상태를 종합적으로 제어하는 역할을 수행하며 모터 콘트롤러는 모터의 비정상 감시논리를 수행한다. 입출력 모듈은 제어컴퓨터로부터의 24V 접점신호를 광격리증폭기(optical isolator)를 사용하여 TTL 형식으로 변환시키는 역할을 수행하고 제어컴퓨터로 입출력되는 모든 데이터 비트의 상태를 LED로 표시하

여 준다. 그리고 2개의 펄스 카운터는 제어컴퓨터로부터의 명령 스텝수와 모터 엔코더로부터 반환된 실제 구동 스텝수를 따로 지시하도록 하여 현장에서의 자기진단기능이 용이하도록 하였다. 신호처리장치의 구성은 그림 4와 같다.

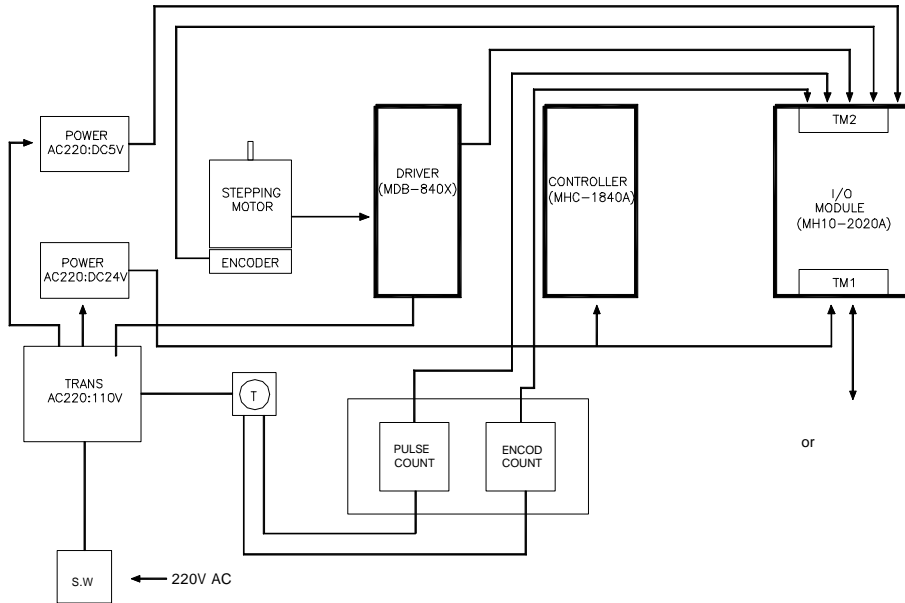


그림 4 국산 신호처리장치의 회로 구성도

### 3.0 시제품 성능시험

제어봉 신호처리장치는 원자력 적용 스텝핑 모터 제어용으로는 처음으로 국산화를 시도하는 것이므로 시스템의 성능 확인은 매우 중요하다. 신호처리장치에 의한 고장 발생 시에는 원자로의 이상상태가 발생할 가능성도 배제할 수 없으므로 비록 시제품이긴 하지만 구동신호 처리의 정확성과 기존 제어봉 구동장치 및 제어 컴퓨터와의 신호 호환성 등에 중점을 두고 성능시험을 실시하였다. 그림 5는 신호처리장치의 시제품 형상을 보여주고 있다. 인터페이스 장치는 3 종류의 서로 다른 시험 과정 즉, Level I 성능시험, Level II 성능시험 그리고 Level III 성능시험 등을 차례로 거쳐 시제품의 성능을 검증하였다.

#### □ Level I 성능시험

Level I 성능시험은 시제품의 설계, 제작이 완료된 후 최초로 성능을 확인하기 위한 시험으로써, 공장인수검사의 성격이었다. 시험신호 발생장치를 이용하여 구동명령신호를 정해진 형식과 일정 시간 동안 반복적으로 출력하면서 신호 입출력상태, 모터 구동 스텝의 정확도, 각종 LED 지시상태 등이 설계요건에 따라 적절하게 구현되었는지를 확인하기 위한 시험이다. [3] 시험신호 발생장치는 제어컴퓨터 입출력 신호 형태와 동일한 형식의 신호를 출력할 수 있도록 개발하였다. 출력단의 스텝핑 모터는 실제 하나로에 사용 중인 모델을 사용하였고 시험신호 발생장치를 이용하여 요구하는 구동 스텝수를 적절히 입력시키고 스텝핑 모터가 오차없이 명령 스텝수만큼 정확하게 움직이는지를 확인하였다.

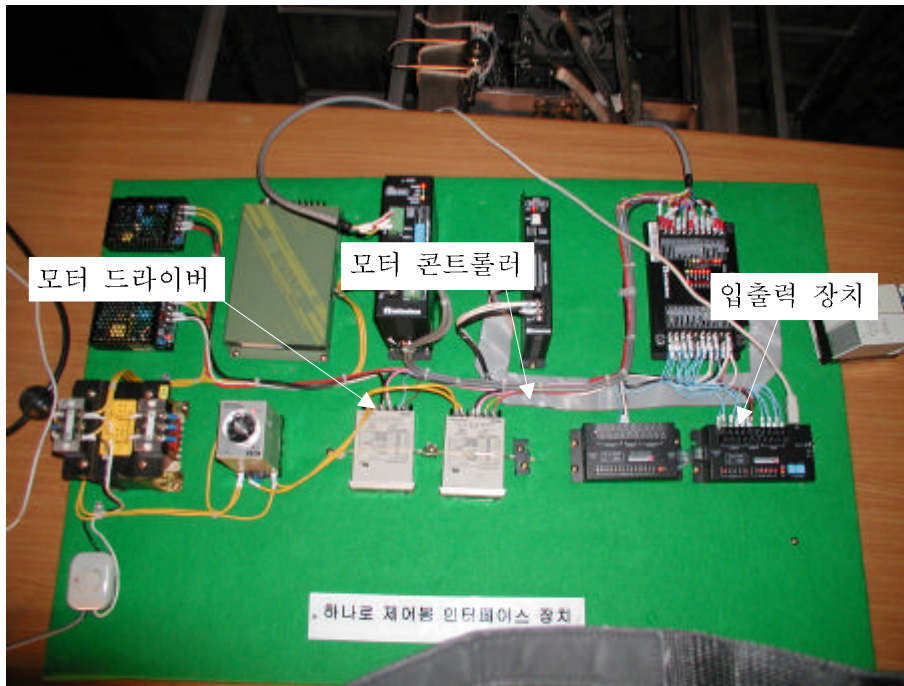


그림 5 제어봉 신호처리장치 시제품의 기기구성

Level I 시험 단계에서 수행하였던 구체적인 시험내용은 “정상상태 구동시험”, “셀백 구동성능 확인시험”, “비정상 구동명령 대처능력 확인시험” 등이었다.

#### □ Level II 성능시험

Level II 성능시험은 Level I 성능시험이 성공적으로 완료되고 난 후 운전여유분으로 보관하고 있는 제어봉 구동장치와 연계하여 실시한 시험이었다. Level II 성능시험 진행 중 비정상 현상이 발생할 경우는 “Change Control Sheet”를 작성하여 제작사에게 통보하였고 비정상의 원인과 해결 방법 등을 자세하게 기록하여 설계변경 이력을 남길 수 있도록 하였다. Level II 성능시험은 하나로 현장에서 시행하였으며 제어봉 구동장치 및 선형위치 변환기 등 실제 제어봉 구동장치를 사용하여 수행하였다. 시험신호 발생장치를 이용한 장시간 구동성능시험을 성공적으로 완료하고 난 후 PLC를 이용한 자동운전모드에 대한 모의시험도 수행하였다.

#### □ Level III 성능시험

Level III 성능시험은 원자로에 설치되어 있는 실제 제어봉 구동장치와 직접 결합시켜 최종적으로 구동성능을 확인하기 위한 현장설치시험(On-site Test) 성격이었다. Level I 및 Level II 성능시험과 시험과정에서 도출된 문제점을 해결하기 위한 설계변경작업 그리고 재시험 등을 통하여 신호처리장치의 성능을 성공적으로 확인하고 난 후 Level III 성능시험을 실시하였다. 현장적용시험은 비록 원자로 정지상태에서 실시하였지만, 제어컴퓨터 입출력 신호와 제어봉 구동장치에 설치되어 있는 스텝핑 모터 및 엔코더 신호와의 호환성을 확인하였다는 측면에서 매우 유용한 시험이었다. 정상 운전조건을 최대한 모의하기 위하여 2대의 1차냉각펌프가 가동 중인 상태에서 시험을 실시하였다. 원자로 출력이 없는 정지상태에서 수행하였기 때문에 제어봉의 자동제어 시험은 불가능하였지만 CRT를 통한 수동모드로서 제어봉 구동 및 낙하성능을 확인할 수 있었다.[4]

#### 4.0 성능시험 결과 및 고찰

Level I 시험은 제작사 공장에서 실시한 인수검사의 성격이었지만 장시간 운전에 대한 성능확인 은 하나로 현장에서 실시하였다. 제한된 명령스텝을 구동하였을 때는 나타나지 않았던 문제점들이 현장의 장시간 운전시험에서 발견되었다. 가능한 한 모든 경우를 모의하기 위하여 약 3개월 동안 계속된 Level I 시험에서 10여건 이상의 설계결함이 발견되어 제작사가 이들을 조치하였다. 설계 변경 후, 실제 운전모드에서는 있을 수 없는 72시간 이상 최대 스피드로 모터를 계속 구동시키면 서 비정상이 발견되는지를 재확인하였고 더 이상의 문제점이 없음을 확인하고 난 후 Level I 시험 을 종료하였다. Level II 시험은 실제 제어봉과 동일한 부하를 매단 상태에서 ±1 스텝부터 ±15 스텝까지의 각 스텝을 표 2와 같이 일정 횟수만큼 반복 구동시키고 비정상 현상이 발생하는지를 확인하였는데 단 1번도 제어봉 고장신호 발생없이 성공적으로 완료되었다.

표 3-2 장시간 운전시험의 총 누적 스텝수

스텝 수	명령 횟수	반복 횟수	반복 스텝수	누적 스텝수
1	10	100	+1,000, -1,000	2,000
2	10	100	+2,000, -2,000	6,000
3	10	100	+3,000, -3,000	12,000
4	10	100	+4,000, -4,000	20,000
5	10	100	+5,000, -5,000	30,000
6	10	100	+6,000, -6,000	42,000
7	10	100	+7,000, -7,000	56,000
8	10	100	+8,000, -8,000	72,000
9	10	100	+9,000, -9,000	90,000
10	10	100	+10,000, -10,000	110,000
11	10	100	+11,000, -11,000	132,000
12	10	100	+12,000, -12,000	156,000
13	10	100	+13,000, -13,000	182,000
14	10	100	+14,000, -14,000	210,000
15	10	100	+15,000, -15,000	240,000

4주 운전 기준으로 하나로의 한 주기동안 예상되는 총 구동 스텝수는 60,000 스텝 정도이므로 4번의 주기 운전 에 해당되는 스텝만큼 반복 시험을 수행한 것이다. 장시간 운전시험 종료 후, PLC를 이용한 자동운전시험을 실시하였다. PLC를 이용한 자동운전시험을 수행하기 위하여 연속 으로 제어봉 구동신호를 출력하는 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 PLC에서 실행되며 변수 변경 등은 개인용 컴퓨터에서 수행한다. PLC 스캔 시간은 하나로 제어컴퓨터와 같이 200msec로 설정하였다. 제어봉을 전 구간 이동시키고 연속운전을 하기 위하여 임의 신호를 만들어 출력하되 그 립 6과 같이 총 스텝은 점차로 증가하도록 하고 제어봉이 제한 지점까지 상승한 후에는 총 스텝

을 다시 감소시켜 자동으로 상하 운전을 반복하도록 하였다. 매 순간마다 출력되는 스텝과 방향은 PLC에 의하여 임의로 정해진다. 이러한 자동운전시험은 72시간 이상 계속 지속되었는데 어떠한 비정상도 발생되지 않았다.

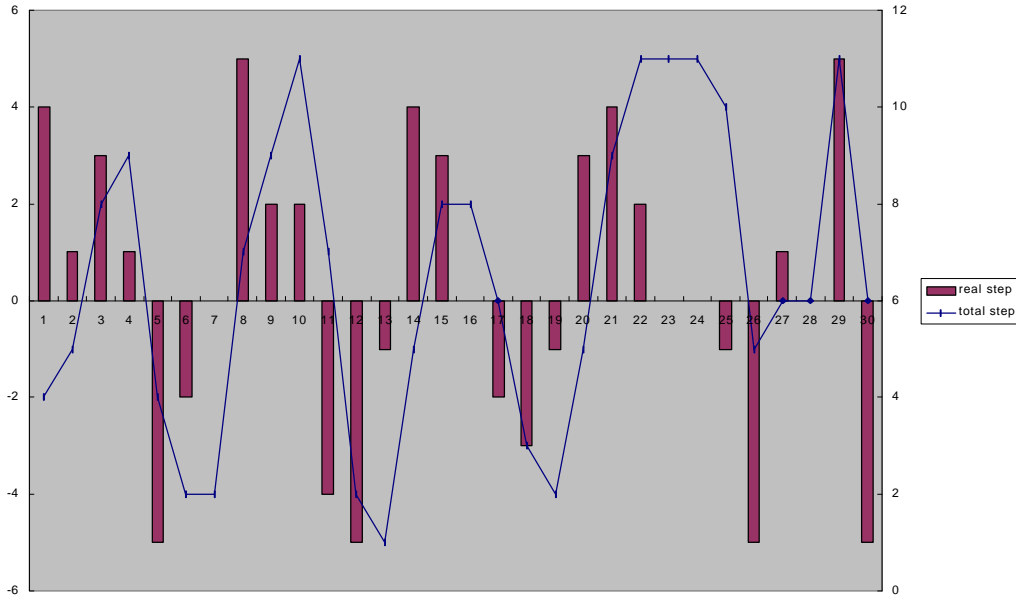


그림 6 PLC에 의한 자동운전시험 모의 신호

Level III 시험은 실제 제어봉에 시제품을 임시 연결하고 제어컴퓨터를 이용하여 수동으로 제어봉을 구동하면서 신호 호환성을 확인하기 위한 것으로서 1차냉각펌프가 가동되는 운전조건 하에서 정상적으로 동작함을 마지막으로 확인하였다.

## 5.0 실제 사용품의 제작

시제품에 대한 종합성능시험이 성공적으로 완료됨에 따라 실제 하나로 운전에 사용할 신호처리 장치의 제작에 착수하였다. 모터 드라이버 및 모터 콘트롤러에 장착되는 소프트웨어는 시제품의 최종 버전과 동일하게 구성하여 탑재하였다. 시제품인 경우는 성능시험을 편리하게 수행하고 각 회로의 내부동작을 직접 측정, 감시하기 위하여 그림 5와 같이 평면에 각 하드웨어들을 분산 배치 하였으나, 실제 사용품은 현장에 설치되어 있는 기존 패널 내부에 장착하여야 하는 제한조건으로 인하여 외함 제작과 내부 기기배치에 신중을 기하였다. 그림 7은 실제 사용품으로 제작된 제어봉 신호처리장치의 형상을 보여주고 있다. 하나로에 사용되는 제어봉은 4개이므로 2개의 운전여유분을 고려하여 모두 6 세트의 실제 사용품을 제작하였다. 실제 사용품에 대한 성능검증시험도 시제품과 동일한 방법과 절차에 따라 진행하고 있고 현재 Level II 시험의 막바지 단계에 있다. 실제 사용품은 시제품과 동일하게 설계, 제작되었고 이미 시제품에 대한 성능검증을 완료한 바 있기 때문에 Level I 시험과정을 거치는 동안 특별한 문제점은 발견되지 않았으며 진행 중인 Level II, III 시험도 성공적으로 완료될 것으로 확신하고 있다. 실제 사용품에 대한 현장 적용은 규제기관과의 협의 및 하나로 운전계획 등을 종합적으로 참고하여 결정할 예정이다.



그림 7 하나로 제어봉 신호처리장치 실제 사용품의 형상

## 6.0 결론

제어봉 신호처리장치의 국산화 개발이 성공적으로 완료됨에 따라 외국 제작사로부터 기술적 독립을 이룩하였고 제어봉 구동의 신뢰도를 높임으로써 안정적 원자로 운전이 가능하게 되었다. 또한, 연구로의 기술수출이 본격적으로 추진되고 있는 상황에서 현재 추진되고 있는 제어봉 기계장치의 국산화가 완료될 경우 100% 순 국내기술로 제어봉 구동장치를 제작 공급할 수 있게 되어 우리의 기술능력을 크게 알릴 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] C. Papas, "Design Manual - Reactor Regulation System" Rev. 3, DM-37-63700-001, 1993. 7. 29
- [2] 김영기, "하나로 제어봉 인터페이스 장치(시제품) 설계 및 제작 국산화", 기술시방서, HAN-RS-DD-SP-637-01-003, 2001. 3. 12
- [3] 미테크노(주), "하나로 제어봉 인터페이스 장치", 시험종료보고서, 2001. 12. 6
- [4] 김영기, "제어봉 구동 인터페이스 장치 종합성능시험", 시험절차서, HAN-RS-OP-IT-637-02-001, 개정 0, 2002. 9. 12