

## 볼스크류형 CEDM용 제어봉 위치지시기의 예비 성능시험

### Preliminary Performance Test of Control Rod Position Indicator for Ballscrew Type CEDM

유제용, 김지호, 허형, 이재선, 김종인

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

볼스크류형 CEDM은 최소이송 거리가 이송거리가 0.25mm로 작고 특히 무방산 운전요건에 적용할 경우 제어봉만으로 노심 반응도를 조절해야 하므로 제어봉의 위치정보는 노심보호계통 설계에 매우 중요하다. 따라서 신뢰성이 우수하고 정확도가 높은 위치지시기의 개발이 필요하다. 이를 위하여 기존 상용 원자로에서 채택하고 있는 RSPT 제어봉 위치지시기에 대한 기술을 바탕으로 하여 볼스크류형 CEDM에 사용될 분해능과 신뢰성이 향상된 리드스위치를 이용한 제어봉 위치지시기를 설계 개발 제작하였다. 본 논문에서는 이러한 일련의 볼스크류형 CEDM의 제어봉 위치지시기 설계 과정에서 확인된 위치지시기의 특성을 정리하고 CEDM의 상부하우징 외벽에 장착하여 상부하우징 안의 영구자석의 위치를 이동시키면서 위치지시기의 예비 성능실험을 수행하였다.

#### 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. A survey on the RSPT(Reed Switch Position Transmitter) type control rod position indication system and its actual implementation in the existing nuclear power plants in Korea was performed first. The prototype of control rod position indicator having the high performance for the ballscrew type CEDM was developed on the basis of RSPT technology identified through the survey. The characteristics of control rod position indicator was defined and documented through design procedure and preliminary performance test.

## 1. 서론

볼스크류형 CEDM에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능을 유지해야 한다. 또한 제어봉 위치지시기는 제어봉의 실제 위치를 센싱하는 역할을 하므로 위치지시기의 신호는 제어계통 신호와 독립적이어야 하고 측정된 위치신호도 만일의 고장에 대비하여 신호 채널이 다중화 되어야 한다. 따라서 위치지시기에서 나오는 안전 계통의 신호는 높은 신뢰성과 정확성을 가져야 한다. 볼스크류형 CEDM에서 필요로 하는 위치지시기는 기존 상용로에서 쓰였던 위치지시기 형태에서 한 단계 더 진보된 성능을 가지도록 설계 제작되어야 한다. 위치지시기의 기본설계를 위해 상용로에 쓰이고 있는 RSPT(Reed Switch Position Transmitter ; 이하 RSPT) 형태의 위치지시기의 관련기술을 근간으로 볼스크류형 CEDM 제어봉 위치지시기의 기본설계를 수행하였다. 본 논문에서는 기본설계에 따라 제작된 위치지시기 시제품에 대한 예비 성능시험 결과를 토대로 향후 제작성과 설계변경 사항들을 논의하고자 한다.

## 2. 작동원리

제어봉 위치지시기는 그림 1과 같이 볼스크류형 CEDM의 상부압력용기 주위에는 리드스 위치를 이용한 4대의 위치지시기 집합체가 독립적으로 설치된다. 압력용기 내부의 연장봉 상부에는 제어봉과 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며 이 영구자석의 위치에 비례하여 압력용기 외벽에 설치된 리드스위치를 이용한 위치지시기는 계단식 아날로그 전압 신호를 출력한다. [1, 2] 위치지시기는 제어봉의 위치를 일정 간격으로 감지할 수 있도록 설계되어야 하며 운전 중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 닫히게 된다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출력된다. 그림 2와 같이 4개의 리드스위치를 이용한 위치지시기는 2개가 한 조가 되어 2개의 위치지시기 홀더에 각각 장착되며 이 위치지시기 홀더는 압력용기 외벽을 감싸는 형태로 장착된다. [3]

4대의 위치지시기 중 2대에는 제어봉의 상한, 하한을 지시할 수 있는 비안전등급의 상부한계스위치, 하부한계스위치가 위치지시기 센서와 독립적으로 설치되어 있다.

제어봉 위치지시기의 구성부품은 크게 위치감지용 영구자석, 리드스위치 및 전기적 분압회로로 나눌 수 있다. 특히 영구자석과 리드스위치는 위치지시기의 정밀도 및 신뢰도와 관계가 있는 부품으로 제품의 선택과 배치는 매우 중요하다. [4, 5, 6, 7] 그림 3은 실제 위치지시기 집합체에 장착된 리드스위치의 실제 모습을 보여 준다.

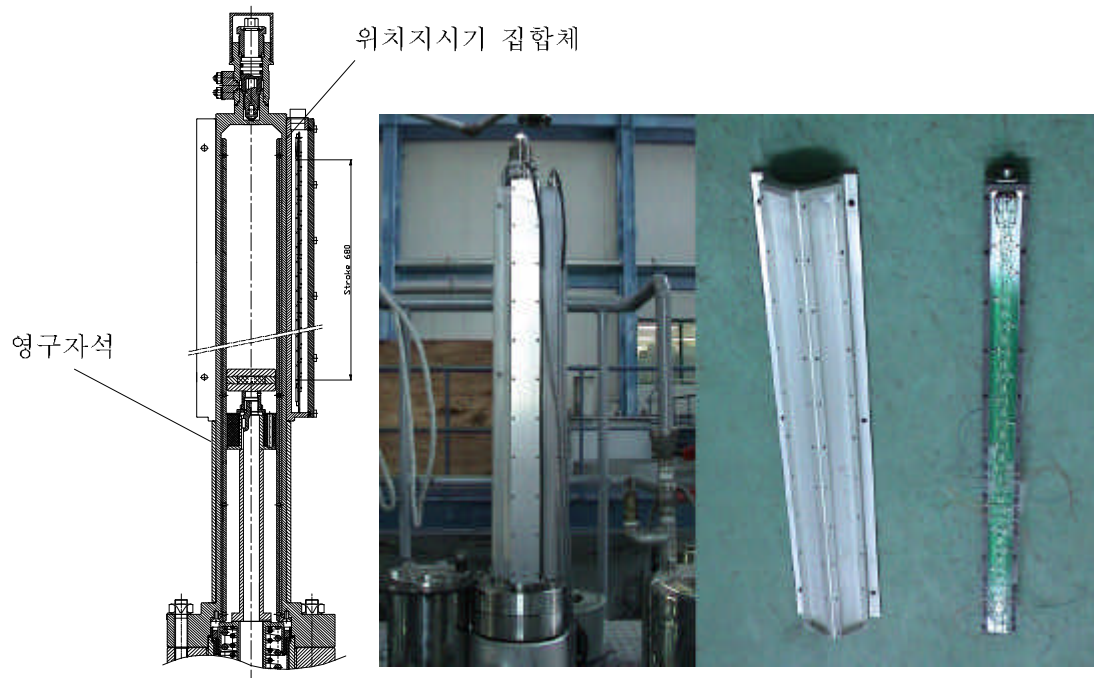


그림 1 위치지시기집합체 장착도 및 실물사진

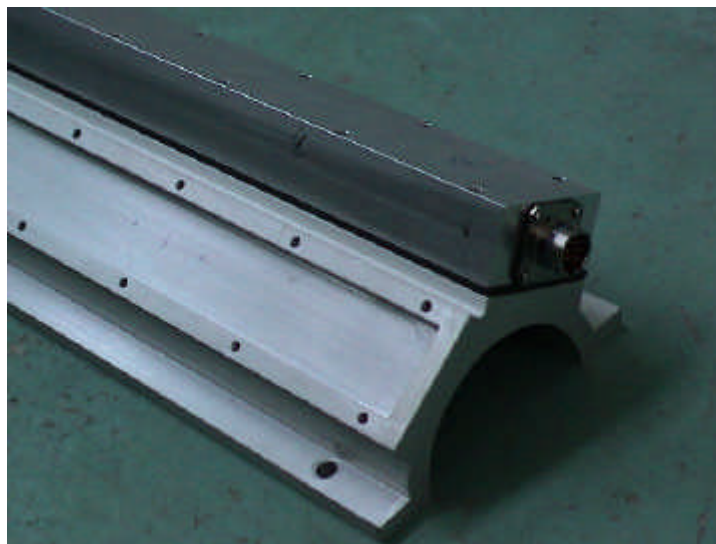


그림 2 위치지시기집합체 및 홀더

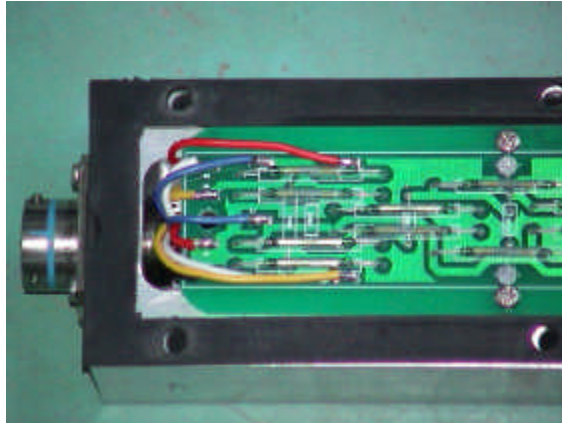


그림 3 위치지시기집합체에 장착된 리드스위치

### 3. 구성부품

제어봉 위치를 감지하기 위해서는 4채널의 위치지시기집합체와 영구자석이 필요하다. 위치지시기집합체는 리드스위치와 저항으로 이루어져 위치지시 센서 역할을 수행하며 4채널로 이루어져 있다. 그리고 4채널 중 2채널에는 제어봉의 상한, 하한을 지시할 수 있는 비안전 등급의 상부 한계스위치(ULS; Upper Limit Switch)와 하부 한계스위치(LLS; Lower Limit Switch)가 위치지시 센서와 독립적으로 설치된다. 상하부 한계스위치는 제어봉이 작동영역 밖으로 움직일 경우 운전원에게 경보신호를 제공하는 비안전 등급 신호이다. 상하부 한계스위치를 이용하여 제어봉의 기준 영점을 확인하거나 초기 위치를 조정하는 작업은 하지 않기 때문에 본 위치지시기집합체에서는 상용로에 존재하는 제어봉 낙하스위치(RDS; Rod Drop Switch)는 존재하지 않는다. 그 이유는 상용로는 행정거리가 길고 제어봉의 기계적 영점위치에서 제어봉구동장치가 CEA를 붙잡고 있지 않는다. 하지만 본 위치지시기 집합체는 초기 기동시 제어봉구동장치가 CEA를 붙잡고 기계적 영점위치에서 부터 바로 기동을 시작하기 때문에 제어봉 낙하 스위치가 필요하지 않다.

블스크류형 CEDM 제어봉 위치지시기와 상하부 한계스위치에 사용되는 리드스위치는 상용원전에서 그 성능이 검증된 ALEPH사의 HYR-2001을 선택하였고 영구자석은 보자력과 자속밀도가 높은 네오디뮴 자석(Nd-Fe-B Magnet) N35UH를 사용하였다. [8]

### 4. 위치지시출력용 분압회로

각 CEDM에는 4대의 위치지시기가 독립적으로 설치된다. 압력용기 내부의 연장봉 상부에는 제어봉과 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며 이 영구자석의 위치에 비례하여 압력용기 외벽에 설치된 위치지시기는 계단식 아날로그 전압신호를 출력한다. 위치지시기는 제어봉의 위치를 20mm 간격으로 감지할 수 있도록 설계되어 있으며 운전 중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 닫히게 된다. 위치지시기 집합

체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 단함에 합당되는 전압신호가 출력된다. 4개의 위치지시기는 위치지시기 홀더에 각각 장착되며 이 위치지시기 홀더는 압력용기 외벽을 감싸는 형태로 장착된다.

위치지시기의 위치검출 분압회로도 는 그림 4와 같다. 입력전원  $V_{in}$ 은 15 VDC, 출력전원  $V_o$ 는 영구자석의 위치(제어봉의 위치)에 따라 3.0V에서 9.8V 까지 변하며 영구자석이 20mm 이동시마다 0.2V의 전압변동이 발생한다. 이러한 전압 변동량 및 각 위치에서 출력되는 전압값은 아래와 같은 분압회로식에 의해서 계산한 것이다.

$$V_o = \frac{R_{\textcircled{5}} + R_{\textcircled{7}} \times (\dots)}{R_{\textcircled{5}} + R_{\textcircled{6}} + 35 \times R_{\textcircled{7}}} \cdot V_{in} \quad (1)$$

이때 전압변동은 리드 스위치 사이의 저항값에 따라 달라지며 그림 4에서 그라운드에 연결된 5번 저항값은  $600 \Omega \pm 0.1\%$ , 6번은  $1000 \Omega \pm 0.1\%$ , 7번은  $40 \Omega \pm 0.1\%$ 의 저항이 설치된다. 매 스텝마다 2개의 리드스위치가 직렬로 연결되어 있는데 그 이유는 리드스위치를 장시간 사용할 경우 리드스위치 리드의 탄성력이 줄어들어 단함 후 영구자석이 존재하지 않는 데도 불구하고 다시 열리지 않는 경우에 대비하기 위함이다.

식(1)에서 출력전압  $V_o$ 는 리드스위치가 3개 단힌 경우와 2개 단힌 경우에 대하여 각각 다른 전압을 나타낸다. 본 설계에서는 제어봉 위치신호로 리드스위치가 2개 단힌 경우에 대한 출력전압 값을 사용한다. 제어봉 영구자석이 어떤 특정위치(예 100mm)에 있을 때의 출력전압은 아래와 같다. 하지만 영구자석의 열적노화에 대비한 마진을 고려한 위치지시기의 정확도(accuracy)는 추후 추가적인 실험을 통해 결정하여야 한다.

$$V_o(100) = \frac{600 + 40 \times 5}{600 + 1000 + 35 \times 40} \cdot 15 = 4 [V]$$

표 1은 그림 4와 같은 분압회로에 의해 위치지시기가 제작되었을 때 20mm 간격마다 출력되는 전압값을 계산한 결과이다. 매 20mm 간격 중간에서 바뀌는 출력전압 신호는 리드스위치가 3개 붙는 영역에서의 출력전압이다. 그림 5는 영구자석 위치에 비례하는 출력전압 계산치의 그래프이다. 모든 제어봉 행정거리 구간 안에서 선형적으로 위치지시기 출력전압이 비례하여 출력되는 것을 알 수 있다. 하부한계스위치용 리드스위치의 중심은 물리적 0점 위치를 기준으로 하여 -20mm에 위치하며 상부한계스위치용 리드스위치의 중심은 물리적 0점 위치를 기준으로 하여 700mm에 위치한다.

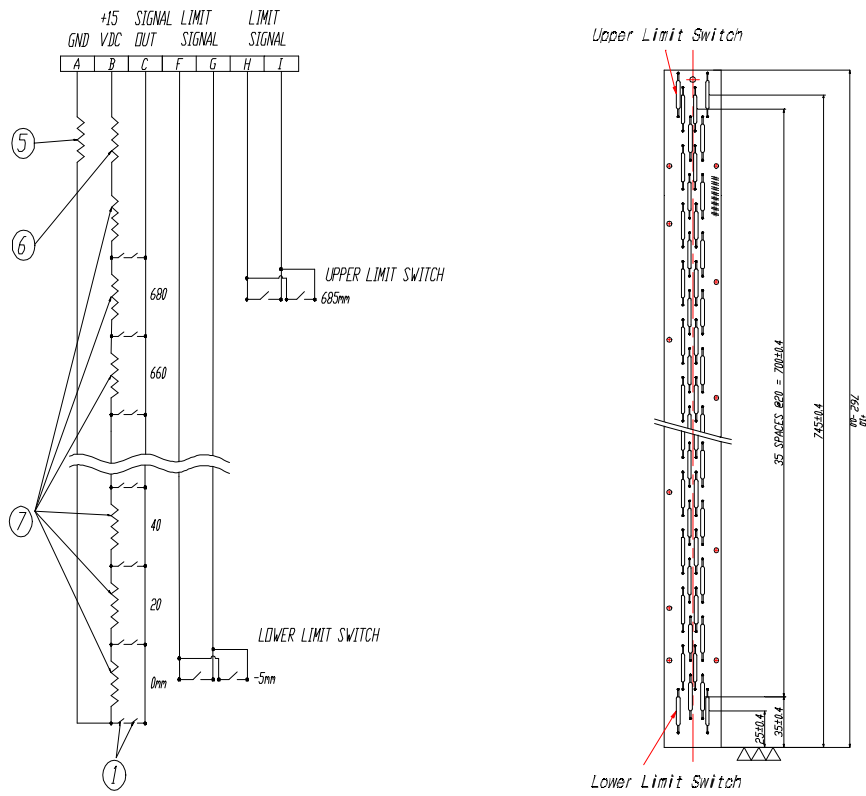


그림 4 위치지시기의 위치검출 분압회로

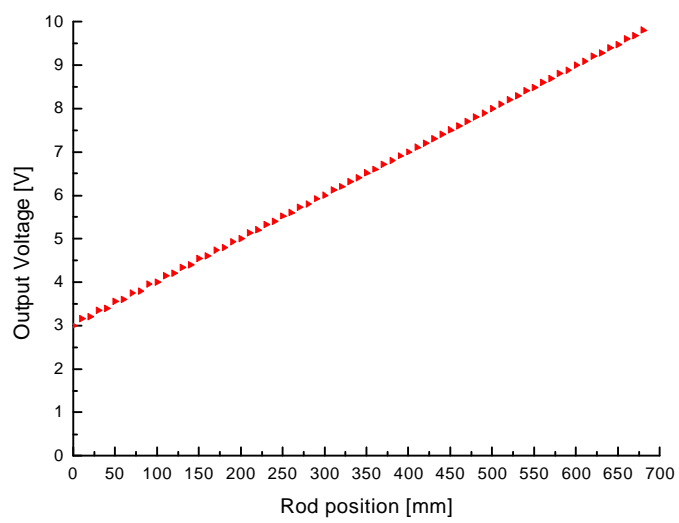


그림 5 위치지시기 출력 전압 분포도

표 1 위치지시기 출력 전압 계산값

(mm)	(V)	(mm)	(V)
0	3	360	6.6
	3.0405		6.6892
20	3.2	380	6.8
	3.2432		6.8919
40	3.4	400	7
	3.4459		7.0946
60	3.6	420	7.2
	3.6486		7.2973
80	3.8	440	7.4
	3.8514		7.500
100	4	460	7.6
	4.0541		7.7027
120	4.2	480	7.8
	4.2568		7.9054
140	4.4	500	8
	4.4595		8.1081
160	4.6	520	8.2
	4.6622		8.3108
180	4.8	540	8.4
	4.8649		8.5135
200	5	560	8.6
	5.0676		8.7162
220	5.2	580	8.8
	5.2703		8.9189
240	5.4	600	9
	5.4730		9.1216
260	5.6	620	9.2
	5.6757		9.3243
280	5.8	640	9.4
	5.8784		9.5270
300	6	660	9.6
	6.0811		9.7297
320	6.2	680	9.8
	6.2838		
340	6.4		
	6.4865		

## 5. 예비성능 시험

4대의 위치지시기가 독립적으로 볼스크류형 CEDM 상부하우징에 설치된 상태에서 영구자석을 10m/sec의 속도로 상승과 하강을 시키고 이때 HBM MGC+ DAS(Data Acquisition

System)을 이용하여 0.02초 간격으로 위치지시기 출력신호를 측정하였다. 그림 6은 4채널의 위치지시기에서 출력되는 전압신호를 동시에 측정한 결과이다. 여기서 대부분의 구간에서 4채널의 위치지시기는 동일한 전압신호를 출력하는 것을 알 수 있다. 이러한 4채널의 정상적인 출력신호를 좀더 자세히 관찰하기 위해 그림 7-(a)에 나타내었다. 하지만 채널 1은 중간 부분, 채널 3은 아래 부분에서 그리고 채널 4는 위 부분에서 나머지 다른 채널과 상이한 출력을 내보내는 것을 알 수 있다. 이러한 비정상적인 출력을 보이는 구간을 그림 7-(b)와 7-(c)에 나타내었다. 비정상적인 거동을 보인 위치지시기의 채널을 분해하여 면밀히 조사한 결과 해당 위치의 리드스위치가 제작과정 중 작업자의 부주의와 솔더링 작업 중 열영향으로 해당 위치의 리드스위치 진공관 밀봉이 파손되어 자기적 감도가 저하된 것을 발견하였다. 또한 한 개의 리드스위치는 2스텝에서의 오차를 유발하는 것을 알 수 있었다. 그림 8은 손상된 리드스위치를 정상적인 리드스위치로 교체한 후 동일한 조건으로 예비성능실험을 수행한 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 영역에서 4채널의 위치지시기가 영구자석의 위치에 비례하여 선형적인 출력전압신호를 생산하는 것을 알 수 있다.

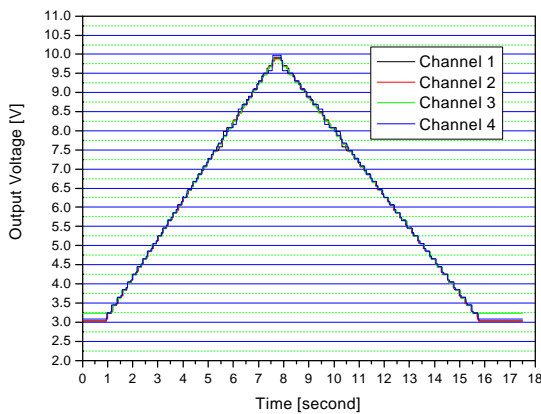


그림 6 4채널 위치지시기 예비성능 시험결과

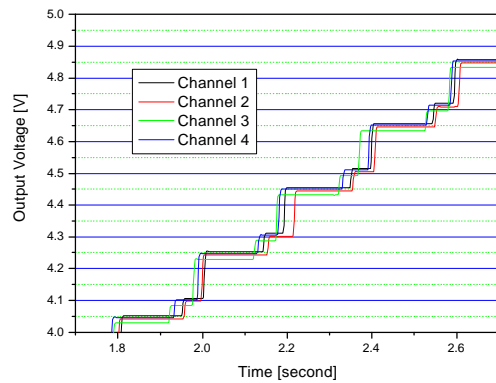


그림 7-(a) 4채널 위치성능 시험결과 (정상적인 영역)

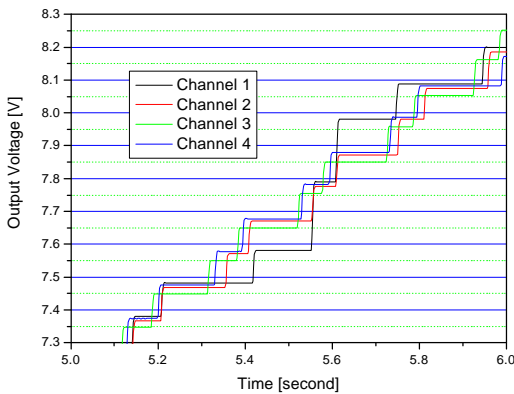


그림 7-(b) 4채널 위치성능 시험결과 (비정상적인 영역)

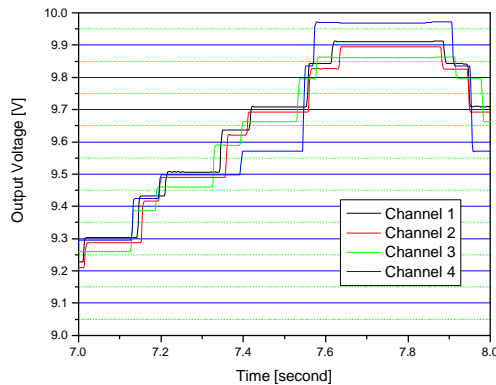


그림 7-(c) 4채널 위치성능 시험결과 (비정상적인 영역)



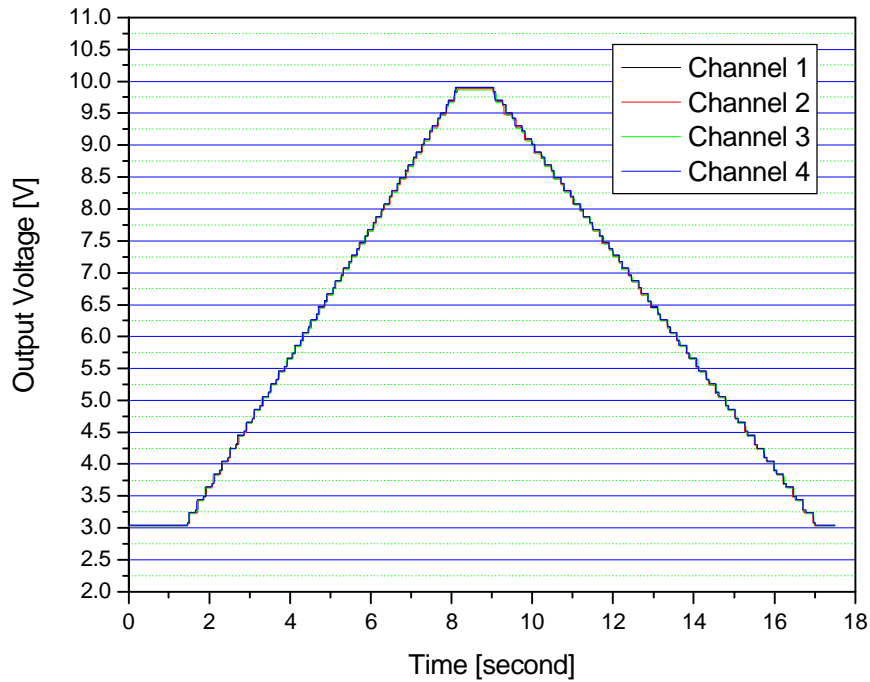


그림 8 리드스위치 교체 후 4채널 위치성능 시험결과

## 6. 결론

볼스크류형 CEDM은 대용량 상용원자료와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발은 중요한 개발분야이다. 볼스크류형 CEDM의 운전 특성을 고려하여 위치지시기는 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있어야 한다. 이를 위해 수치적으로 계산된 각 부품들의 선정과 전자기 해석을 통해서 위치감지용 영구자석에 자속집속기를 설계를 통해 위치지시기집합체의 시제품을 제작하였다. 제작된 위치지시기 시제품의 예비 성능시험을 통해 설계/제작 된 위치지시기의 성능이 설계기준을 만족하는 것을 확인하였다. 아울러 리드스위치의 고장에 따른 위치지시기의 위치측정 능력 저하가 어느 정도인가를 정량적으로 평가하였다. 이러한 일련의 위치지시기의 예비성능시험을 통하여 위치지시기를 제작과정에서의 주의사항 및 품질관리 절차의 개선점이 파악되었다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 유제용 외 다수, 제어봉 위치지시기의 설계기술 분석-KAERI/AR-551/99, 한국원자력연구소, 1999
- [2] 유제용 외 다수, “Development of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive Mechanism for SMART”, International Conference on Nuclear Engineering, ICONE9-No.318, 2001
- [3] 유제용 외 다수, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '99 추계 원자력학술발표회 요약집, 1999
- [4] 유제용 외 다수, 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기 개발, pp. 921, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집(D), 2001
- [5] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기용 자속집속기 설계, 2002 춘계 원자력학술발표회, 2002
- [6] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기에 쓰이는 리드스위치의 자기장 및 히스테리시스 분석, 2002 추계 원자력학술발표회, 2002
- [7] 유제용 외 다수, Development of Magnetic Flux Concentrator of Position Indicator for SMART CEDM, ANS 2002 Winter Meeting, 2002
- [8] Aleph Reed Switches - Products Catalog, 1999