

JRTR 제어봉구동장치에 내진시험

Seismic Test of the Control Rod Drive Mechanism for JRTR

최명환[†] · 김경호^{*} · 선종오^{*} · 조영갑^{*}

Myoung-Hwan Choi, Gyeong-Ho Kim, Jong-Oh Sun and Yeong-Garp Cho

(Received May 30, 2016 ; Revised July 21, 2016 ; Accepted August 9, 2016)

Key Words : JRTR(요르단연구용원자로), CRDM(제어봉구동장치), Seismic Test(내진시험), Test Rig(시험장치), OBE(운전기준지진), SSE(안전정지지진)

ABSTRACT

A control rod drive mechanism(CRDM) is a reactor regulating system, which inserts, withdraws or maintains a control rod within a reactor core to control the reactivity of the core. The CRDM for Jordan Research and Training Reactor with 5MW power has been designed and fabricated based on the HANARO's experience through KAERI and DAEWOO consortium. This paper describes the seismic test results to demonstrate the operability, the drop performance and the structural integrity of CRDM during or after seismic excitations. The seismic tests are carried out under 5 OBE and 1 SSE loads at three Test Rigs simulating the reactor structure and the pool top. From the tests, the CRDM is smoothly driven without a malfunction of stepping motor under OBE load. The pure drop time under OBE and SSE loads is measured as 1.169s and 1.855s to meet the design requirement. Also, it is found that the CRDM maintains the structural integrity without a change of the function and natural frequency before and after seismic loads.

1. 서 론

제어봉구동장치(control rod drive mechanism: CRDM)는 원자로가 정상운전중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심 반응도를 적절히 제어하며, 또한 원자로 계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때 제어봉을 신속하고 정확하게 노심 내부로 삽입시켜 운전을 정지시키는 기능을 한다. 제어봉구동장치는 최초의 원자로 가동과 함께 다양한 형식이 개발되어 원자로 제어시스템으로 사용되어 왔다. 국내·외의 가압경수로형 상용원자로에는 주로 모터로

구동되는 래치형 마그네틱 잭 방식, 일체형 원자로에는 볼스크류 방식의 제어봉구동장치가 사용되기도 한다^(1,2). 또한 연구용 원자로에는 주로 전자석을 이용한 모터구동방식이 이용되고 있으며, 수압을 이용하여 제어봉을 구동하는 원자로도 운영되고 있다^(3,4). 국내의 다목적 연구로인 하나로(HANARO)는 1995년부터 정상가동되고 있으며, 원자로 수조 상부에서 스텝모터를 이용한 제어봉구동장치가 사용되고 있다⁽⁵⁾.

한국원자력연구원에서는 HANARO의 설계, 건설 및 운영경험을 기반으로 연구 및 교육을 목적으로 하는 원자로를 요르단에 수출하여 지난 4월 25일 첫 가동을 시작하였다. 요르단 연구용원자로(Jordan

[†] Corresponding Author; Member, Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail : mhchoi@kaeri.re.kr
^{*} Korea Atomic Energy Research Institute

[#] A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference
[‡] Recommended by Editor Hyung Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Research and Training Reactor; JRTR)는 5 MW 출력을 갖고, 노심의 반응도 제어를 위하여 4개의 제어봉구동장치와 2개의 이차정지구동장치(second shutdown drive mechanism: SSDM)가 사용된다⁽⁶⁾.

반응도 제어장치는 원자로 수명기간 동안에 동작되어야 하고, 원자로 안전에 관련되어 있기 때문에 그 기능 및 성능을 검증하는 것은 중요하며, 검증시험을 위한 지침이 개발되었다⁽⁷⁾. 일반적으로 CRDM에 대한 성능검증은 구동성능, 낙하성능, 내구성능, 내진시험, 사용 환경에 따른 환경시험 등을 수행하여 수명기간 동안의 안전한 사용 가능성을 확인한다. Choi⁽⁸⁻¹⁰⁾는 JRTR의 출력제어 시스템인 제어봉구동장치에 대한 구동성능, 낙하성능, 내구성능 및 진동측정 등의 시험을 통하여 성능을 검증하였고, 구조건전성 평가를 위한 내진시험을 수행하였다. 또한 CRDM 성능의 중요한 검증 항목 중 하나로 지진하중에 의한 구동장치의 구동 및 낙하성능의 검증이 필요하게 되었다.

이 논문에서는 요르단 연구용원자로 제어봉구동장치의 성능검증 중 내진시험 결과에 대하여 기술하였다. 내진시험은 지진하중을 가하는 동안에 그리고 시험 전과 후에 스텝모터의 구동시험, 공진탐색을 통한 고유진동수 측정, 낙하시험, 시험 완료 후 육안검사를 수행하였다. 이때 지진하중으로는 원자로 바닥과 상부에서의 운전기준지진(operating basis earthquake; OBE)과 안전정지지진(safe shutdown earthquake; SSE)이 사용되었다. 또한 내진시험은 CRDM의 구조 및 시험 조건 등을 종합적으로 고려하여 설계, 제작된 3개의 시험장치를 이용하였고, CRDM이 지진하중 하에서 구조적 건전성을 유지하며 원활히 작동하고 낙하한다는 것을 검증하였다.

2. CRDM 구조 및 시험장치

Fig. 1은 수조 내부의 원자로 구조물에 CRDM이 설치된 형태의 개념도를 나타내었다. CRDM은 크게 구동장치(drive assembly), 연결봉(tie rod), 트랙과 캐리지(tracks, carriages), 제어봉(control absorber rod; CAR), 제어봉안내관(CAR guide tube), 구동장치 고정을 위한 상하부 브라켓(bracket)으로 구성되며, 좀 더 상세한 설명은 참고문헌⁽⁹⁾에 기술되었다.

반응도 제어장치의 성능검증에는 4개의 시험장치가

사용되었는데, 시험장치 #1은 원자로 높이와 노심 구조를 실제 원자로와 동일하게 모사한 장치로서 1개씩의 CRDM과 SSDM을 설치하여 구동성능, 낙하성능, 내구성능 등의 시험을 수행하였다⁽⁹⁾. 그러나 약 12 m 높이의 수조와 유체계통을 모사한 시험장치 #1을 이용하여 지진하중을 모사한 내진시험을 수행하는 데에는 현실적으로 어려움이 있었다. 따라서 CRDM의 연결봉을 기준으로 원자로 구조물 부분과 상부 수조벽에 설치되는 부분으로 나누어 시험장치를 제작하고 내진시험을 수행하였다.

원자로 구조물을 모사한 시험장치 #2는 1/4 노심 구조, 제어봉, 제어봉안내관, 트랙과 캐리지가 설치되었고, Fig. 2와 같은 형상을 갖는다. 이 시험장치는 모달해석과 시험을 통하여 원자로 구조물과 비슷한 동특성을 갖도록 설계, 제작하였고, 제어봉의 낙하시험을 수행하였다. 이때 구동장치는 감쇠장치가 포함된 dummy 구동장치를 이용하였다.

시험장치 #3은 Fig. 3과 같이 수조벽 상부를 모사한 시험장치로서 33 Hz 이상의 고유진동수를 갖도록 설계, 제작되었다. 이 장치에서는 연결봉 상부의 구동장치를 설치하여 지진하중 하에서의 구동시험 및 구동장치의 낙하시험을 수행하였다. 이때 연결봉 아래의 구동부는 무게추로 모사하였는데, 무게추는 구동부의 무게 뿐만아니라 OBE 하중으로 인한 수직방향 최대 동적하중을 고려하여 결정하였다.

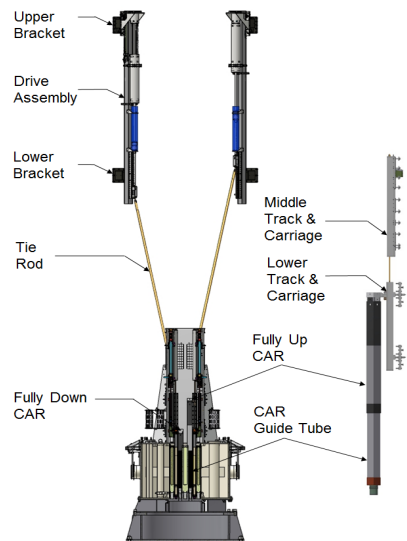


Fig. 1 Overall view of CRDM for JRTR

시험장치 #4는 구동장치의 수직방향(Z축) 지진하중에 대한 시험을 위해 구동장치의 브라켓을 설치할 수 있는 단순 구조물이다. 이 장치에서는 Fig. 4와 같이 X-Z 방향을 가진하게 되며, Type 1은 브라켓이 가진대 바닥에 설치된 경우이고, Type 2는 구동

장치를 90° 회전시켜 수직면에 설치된 경우로 나누어 내진시험을 수행하였다.

3. 내진시험

3.1 주요 요건 및 지진하중

JRTR 제어봉구동장치는 USNRC Reg. guide에 따라 내진등급 I로 분류되었으며⁽¹¹⁾, 내진시험은 3개의 시험장치에서 IEEE 344-2004을 준용하여 작성된 내진시험 절차서에 따라 수행하였다^(12,13). 시험결과에의 평가를 위한 주요 요건으로 첫째, 스텝모터는 운전기준지진(OBE) 하에서 정상적으로 작동하여야 한다. 둘째, 안전정지지진(SSE) 하에서 제어봉이 낙하 가능하고, 감쇠전 낙하시간은 2.0초 이내 이어야 한다. 마지막으로 CRDM은 내진시험 중 그리고 후에 구조적 건전성을 유지하여야 한다.

이 연구에서의 지진하중은 원자로 바닥과 상부에서의 층응답스펙트럼(floor response spectrum: FRS)을 기준으로 요구응답스펙트럼(required response spectrum: RRS)을 생성하였으며, 실제 시험에서의 시험응답스펙트럼(test response spectrum: TRS)은 RRS를 모두 포함하도록 가진대에 입력되었다. 이때 시험장치 #2에서는 원자로 바닥에서의 값, 시험장치 #3에서는 원자로 수조 상부에서의 방향별 값을 적

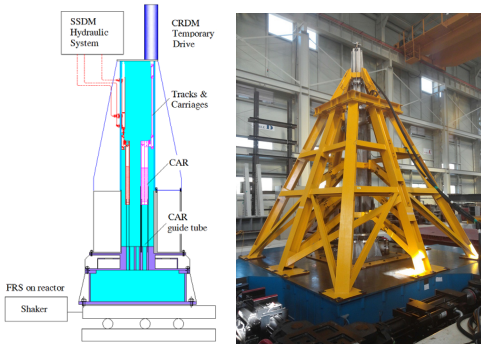


Fig. 2 Schematic view and photo of test rig #2

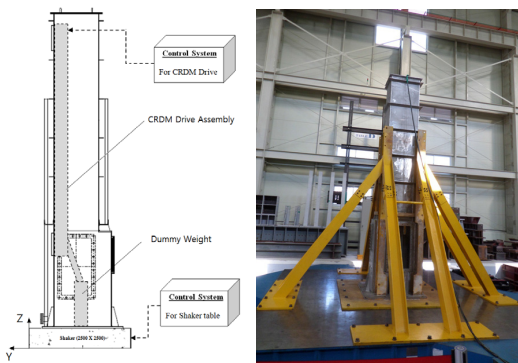


Fig. 3 Schematic view and photo of test rig #3

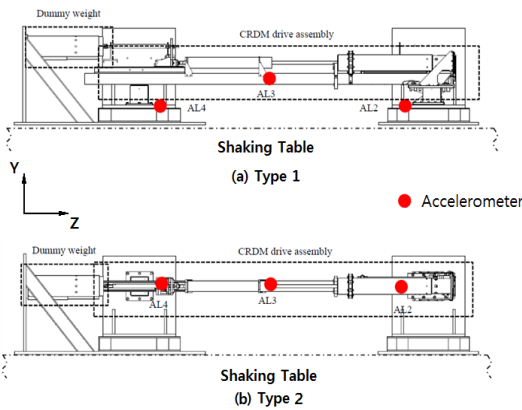
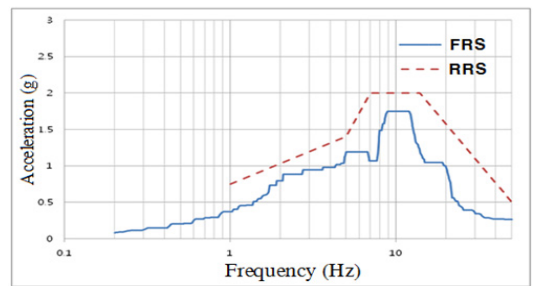
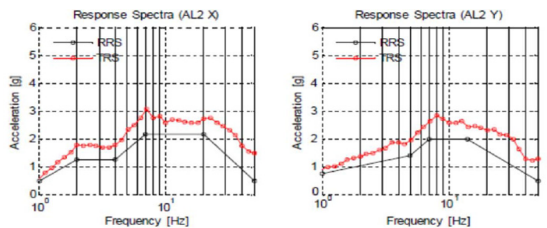


Fig. 4 Overall view of test rig #4 & drive assembly



(a) FRS and RRS (Y-dir, 5% damping)



(b) RRS and TRS

Fig. 5 Example for OBE load on the reactor pool top

용하였으며, OBE 하중은 SSE/2 값을 적용하였다. Fig. 5는 시험장치 #3의 내진시험에 적용한 원자로 상부에서의 OBE 하중에 대한 예를 나타내었다.

3.2 시험방법 및 절차

CRDM의 내진시험은 부산대학교 지진방재연구센터에서 수행되었으며, 60 ton 용량의 2축 수평 가진 이 가능한 MTS社의 가진대를 포함한 장비 및 시설을 이용하였다⁽¹⁴⁾. CRDM을 포함한 시험장치들은 가진대와 M30 볼트로 체결되었고, 진동특성은 PCB 3축 가속도계(Model: 356A16), 낙하시간 측정은 고속카메라와 선형변환기를 이용하였다. Table 1은 내진시험 관련한 주요사항을 요약하였다.

시험장치 #2와 #3에서는 지진하중 하에서의 낙하 시간 측정 및 CRDM의 구조적 건전성을 평가하였다. 이때 구조건전성 평가시험은 OBE 5회와 SSE 1회의 하중을 적용하였고, 시험 전과 후에 공진탐색을 통하여 얻은 고유진동수의 변화를 고찰하였다. 시험장치 #2에서는 고속카메라, 시험장치 #3에서는 구동장치에 있는 선형변환기를 이용하여 낙하시간을 측정하였고, 시험장치 #3에서는 OBE 하중 상태에서 스텝모터를 전진/후진 모드로 구동하여 구동성능 시험을 수행하였다.

시험장치 #4에서는 시험장치 #3에서 측정하지 못한 축방향(Z축) 가진에 따른 구조건전성 평가시험을 수행하였다. 이때 축방향 지진하중은 수직 설치된 구동장치의 중력 효과를 보상하여 RRS에 1.0 g를 추가하여 생성된 지진하중을 적용하였다.

Table 1 Summary for seismic test of CRDM

	Rig #2	Rig #3	Rig #4
No. of acc.	8	3	4
Resonance search test	○	○	○
Drop test	Camera	L.T.	×
Stepping test	×	○	○
OBE load	5 times S.I. 1 drop	5 times S.I. 1 drop 1 stepping	5 times S.I.
SSE load	1 drop	1 drop	1 time
FRS Position	Pool bottom	Pool top	Pool top

Camera : high speed camera with 700 fps
L.T. : linear transducer on the drive assembly
S.I. : structural integrity

4. 결과 및 고찰

4.1 시험장치의 검증

CRDM이 설치되는 시험장치는 실제 원자로구조물과 같거나 유사한 동적 특성을 갖아야 내진시험 결과에 의미가 있다. 이 연구에서는 해석을 통한 원자로 구조물의 고유진동수와 모드형상을 기초로 하여 시험장치의 고유진동수가 해석값과 ±10 % 이내의 범위에 있거나 33 Hz 이상이 되도록 구현하였다.

Table 2와 Fig. 6은 원자로집합체에 대한 해석결과와 시험장치 #2의 시험을 통한 고유진동수 및 모드형상을 나타내었다. 정현파 공진탐색으로 구한 시험장치의 기본진동수는 25 Hz이고, 모드형상은 8개의 가속도계 신호 중 가장 큰 신호로 정규화하여 나타내었다. 이들 시험 결과는 해석을 통한 원자로집합체의 고유진동수 및 모드형상과 잘 일치하였으며, 이를 통하여 이 내진시험은 실제와 유사한 동특성을 갖는 시험장치에서 수행될 수 있다는 것을 확인하였다. 상대적으로 단순한 시험장치 #3에 대해서도 모달 해석 및 측정을 통하여 동특성 검증을 완료하였고, 그 후에 CRDM을 시험장치에 설치하여 내진시험을 수행하였다.

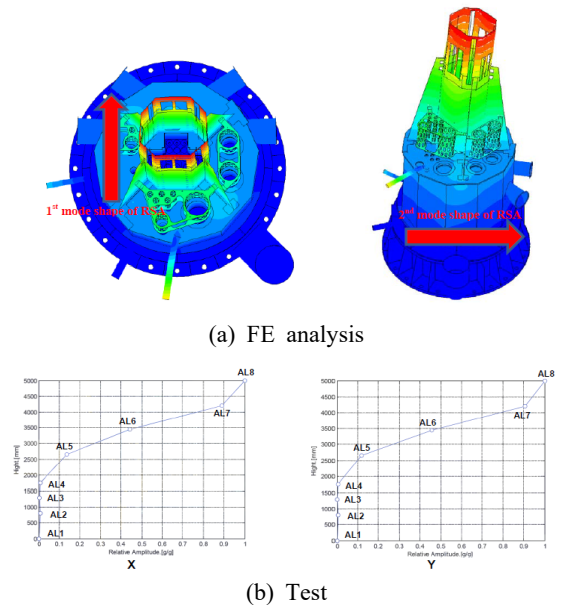


Fig. 6 Mode shapes of reactor structure assembly and test rig #2

Table 2 Natural frequencies of test rig #2

Modes	Natural frequency (Hz)		Error ¹⁾ (%)
	Test	FEA	
1st (Y-Dir.)	25.0	23.8	4.8
2nd (X-Dir.)	26.5	26.3	0.8

¹⁾ Error = (Test-FAE)/Test × 100

Table 3 Drop test results during seismic excitation

Load	Seismic delay time ¹⁾ (s)		Total delay time ²⁾ (s)	Total drop time ³⁾ (s)	Req. (s)
	Rig #2	Rig #3			
OBE	0.161	0.028	0.189	1.169	2.0
SSE	0.810	0.065	0.875	1.855	

- 1) Difference of results before and during seismic excitation
- 2) Summation of results at Rigs #2 and #3
- 3) Summation of pure drop time(0.98 s) at test rig #1 and total delay time due to seismic load

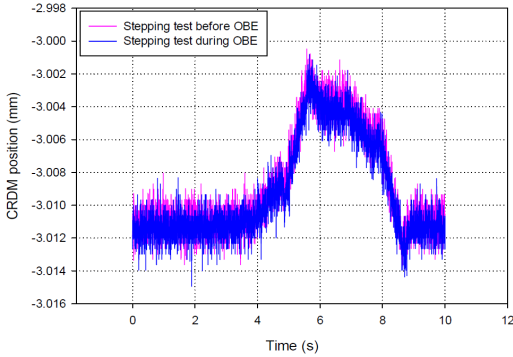


Fig. 7 Stepping performance test results before/during OBE excitation

4.2 구동 성능시험

구동성능시험은 시험장치 #3에서 OBE 하중 상태에서 스텝모터가 성능을 유지하며 오작동 없이 구동되는 것을 평가하기 위하여 수행하였다. 모터의 구동은 전진과 후진을 반복하며 상승 혹은 하강시키는 운전을 하였으며, 가진 전과 가진 중 측정된 위치신호를 비교하여 성능을 평가하였다. Fig. 7은 구동성능시험 결과를 나타낸 것으로 가진 전과 OBE 가진 중에 측정된 위치신호는 동일한 결과를 보였다. 따라서 스텝모터는 OBE 하중 하에서도 오작동 없이 원활히 구동되었음을 확인하였다.

4.3 낙하 성능시험

지진하중 하에서의 낙하시험은 낙하성능 및 낙하 시간 요건에 대한 확인을 위하여 CRDM 하부와 상부의 부분집합체를 포함하는 시험장치 #2와 #3에서 각각 수행하였다. CRDM의 낙하시간은 원자로 정상 운전 상태인 시험장치 #1⁽⁹⁾에서의 최대 낙하시간(0.98 초)과 지진하중으로 인하여 지연된 시간의 합으로 평가하였다. 이때 지진하중으로 인한 지연시간(delay time)은 각각의 시험장치에서 지진하중 전과 지진하중을 가한 상태에서 측정된 값의 차이로 결정하였다.

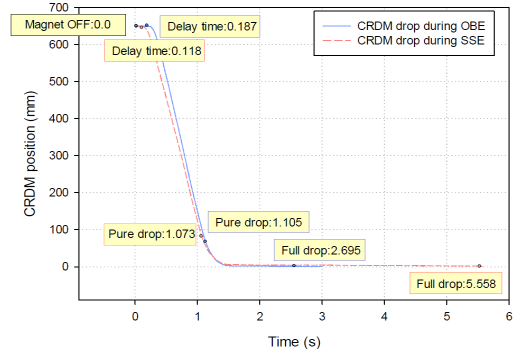


Fig. 8 Drop curves during seismic loads at test rig #3

Table 3은 두 시험장치에서 측정된 OBE와 SSE 하중으로 인한 낙하지연시간 및 전체 낙하시간을 요약하여 나타내었다. 시험장치 #2의 SSE 하중 상태에서 비교적 큰 0.81초의 지연시간을 보였다. 또한 OBE 보다는 SSE 하중에서 그리고 시험장치 #2에서 더 큰 지연시간을 보였는데, 이는 시험장치가 상대적으로 복잡하고 하중도 SSE가 크기 때문에 낙하 시간이 더 지연된 것으로 생각된다.

최종적으로 평가된 낙하시간은 OBE와 SSE 하중 하에서 각각 1.169초와 1.855초이다. 이는 지진하중 동안의 감쇠전 낙하시간에 대한 설계 요건인 2.0초를 잘 만족하였다. 또한 시험장치 #2와 #3에서의 내진시험을 수행하는 동안 CRDM은 전자석의 전원 차단 시 요구된 시간 내에 낙하된다는 것을 확인하였으며, SSE 하중 하에서도 우수한 낙하성능을 보였다. Fig. 8은 시험장치 #3에서 지진하중을 가한 상태에서 선형 변위계로 측정된 낙하곡선의 예를 나타내었다.

4.4 구조건전성 평가시험

시험장치 및 CRDM의 구조건전성은 5회의 OBE와

Table 4 Resonance search test results at test rig #3

No.	Dir.	Resonance frequency (Hz)		Remark
		Acc2	Acc3	
1	X	42.50	43.50	Commissioning test (in water)
	Y	46.00	47.50	
2	X	43.25	43.50	Before seismic test
	Y	46.00	46.75	
3	X	43.25	43.50	After seismic test
	Y	45.75	46.75	
4	X	42.25	42.75	Before drop test
	Y	45.75	46.50	
5	X	42.50	42.75	After drop test
	Y	46.50	47.50	

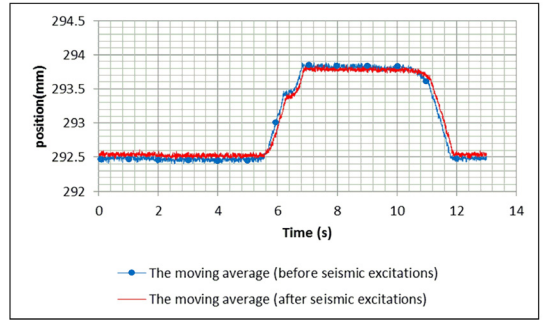


Fig. 9 Stepping performance test results (Type 2)

Table 5 Resonance search test results at test rig #4 (Type 2)

No.	Dir.	Resonance frequency (Hz)			Remark
		Acc2	Acc3	Acc4	
1	X	Above 50	22	Above 50	Before seismic test
	Z	Above 50	47	Above 50	
2	X	Above 50	23	Above 50	After seismic test
	Z	Above 50	47	Above 50	

1회의 SSE 가진 전과 후에 공진탐색을 통해 얻은 고유진동수의 변화, 스텝모터의 구동성능, 시험 완료 후의 측정 및 육안검사 등을 종합하여 평가하였다.

Table 4는 시험장치 #3에서의 내진시험 전후에 공진탐색시험으로 측정한 고유진동수를 나타내었다. 시험장치는 X와 Y방향으로 각각 43 Hz와 46 Hz의 고유진동수를 보였으며, 이들 결과는 내진시험 후에도 변화 없이 거의 동일한 값을 유지하였다. 시험장치 #3에서는 OBE 하중을 가한 상태에서 CRDM의 전자석이 구동부의 무게를 유지하였고, 스텝모터가 오작동 없이 성능을 유지하며 원활히 구동되는 것을 확인하였다. 또한 지진하중 상태에서 전자석 전원 차단 시 요구된 시간 내에 낙하되는 것을 확인하였다.

시험장치 #4에서는 시험장치 #3에서 측정하지 못한 구동장치의 축방향 지진하중에 대한 건전성 평가를 위하여 구동장치를 눕혀 설치한 두 경우에 대하여 내진시험을 수행하였다.

Table 5는 구동장치 브라켓을 수직으로 설치한 경우 (Type 2)의 시험결과를 나타내었다. 시험장치는 기본적으로 강체구조이기 때문에 지진하중인 응답스펙트럼의 가진 범위를 넘어선 50 Hz 이상의 고유진

동수를 보였다. 구동장치 지지보의 중앙에 설치된 가속도계(Acc3)로 측정한 고유진동수는 X방향 23 Hz, Z방향 27 Hz를 보였으며, 가진대의 바닥면에 설치한 경우 (Type 1)에도 비슷한 결과를 보였다. 따라서 이들 결과로부터 구동장치는 지진하중에 대하여 동특성 변화 없이 건전성을 유지하였음을 확인하였다.

Fig. 9는 Type 2의 경우에 대하여 내진시험 전과 후에 hunting mode로 스텝 모터를 구동하여 측정한 위치 결과를 나타내었다. 내진시험 전과 후의 위치 차이는 0.46 mm로 매우 작았으며, 구동장치는 지진하중을 받은 후에도 구조적인 문제없이 거의 동일한 구동 특성을 보임을 알 수 있다.

마지막으로 3개의 시험장치에서 내진시험이 완료된 후에는 구동장치 및 시험장치의 부품들에 대한 손상과 체결 볼트의 풀림 등을 육안으로 검사하였다. 특히 낙하시험 후, CRDM의 스텝모터는 구동명령에 따라 원활한 동작을 보였고, 체결 볼트들에 대한 풀림도 발견되지 않아 구조적으로 안정한 상태에서 내진시험이 수행되었음을 확인하였다.

5. 결론

요르단 연구용원자로 제어봉구동장치의 OBE와 SSE 지진하중에 대한 내진시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 내진시험은 본품과 동일하게 제작된 원형과 원자로 구조물과 유사한 동특성을 갖도록 설계, 제작된 3개의 시험장치를 이용하였고, CRDM의 구동 성능, 낙하성능, 구조건전성을 평가하였다.

(2) 제어봉구동장치의 스텝모터는 hunting, 전진과 후진 모드의 운전에 대하여 지진하중 전과 후, 그리

고 가진 중에도 오작동 없이 원활한 구동을 보였다.

(3) 지진하중 조건에서의 총 낙하시간은 OBE 하중에서 1.169초, SSE 하중에서 1.855초로 측정되었으며, 이들은 설계요건인 2.0초를 만족하였다.

(4) 구동장치 및 시험장치는 OBE 5회와 SSE 1회의 지진하중에 대하여 시험 전과 후에 거의 동일한 고유진동수를 보였고 그 기능을 유지하며 구조적으로 건전함을 보였다.

(5) 내진시험 후의 구동장치 및 시험장치에 대한 육안검사 결과는 시험 전과 차이가 없었으며, 지진하중으로 인한 마모나 손상이 발생하지 않았음을 확인하였다.

(6) 제어봉구동장치는 OBE 하중하에서 정상적인 구동성능을 보였고, SSE 하중하에서 낙하시간 요건을 만족하는 낙하성능을 보였다.

References

(1) Lee, J. S., Choi, S. and Song, C. H., 2008, State of Art Report for Developing a Control Element Drive Mechanism of the APR+ Reactor, KAERI/AR-805/ 2008, KAERI.

(2) Choi, M. H., Kim, J. H., Huh, H. and Yu, J. Y., 2010, Drop and Damping Characteristics of the CEDM for the Integral Reactor, Trans. of the KSNVE, Vol. 20, No. 7, pp. 658-644.

(3) Park, C., Lee, B. C., Chae, H. T., Jeong, H. S., Cho, Y. G. and Seo, C. G., 2002, Status and Design Characteristics of Research Reactor, KAERI/AR-657/ 2002, KAERI.

(4) Hanliang, B., Wenxiang, Z. and Duo, D., 2000, Studies on the Performance of the Hydraulic Control Rod Drive for the NHR-200, Nuclear Engineering and Design, Vol. 195, pp.117-121.

(5) Seo, C. G., Cho, Y. G., Ryu, J. S. and Shin, J. W., 2008, Improvement the CRDM Damping Mechanism for an AHR, Trans. of the KNS Spring Meeting.

(6) Choi, M. H., Cho, Y. G., Kim, S. H., Huh, H. and Kim, J. I., 2011, Basic Design of the Top-mounted CRDM for a Reactor with Plate Type Fuels, Trans. of the KNS Autumn Meeting, pp. 71-72.

(7) Huh, H. et al., 2011, Guidelines for Qualification

Test of Control Rod Drive Mechanism, JR-317-KM-418-002, Rev.0, KAERI.

(8) Choi, M. H., Cho, Y. G., Kim, J. H. and Lee, K. H., 2015, Performance and Endurance Tests of the Top-mounted CRDM for JRTR, Trans. of the KNS Spring Meeting.

(9) Choi, M. H., Cho, Y. G., Kim, J. H. and Lee, K. H., 2015, Performance Qualification Test of the CRDM for JRTR, Trans. of the KSNVE, Vol. 25, No. 12, pp. 807-814.

(10) Choi, M. H., Kim, K. H., Sun, J. O. and Cho, Y. G., 2016, Seismic Test for the Structural Integrity Evaluation of JRTR CRDM, Proceedings of the KSNCE Annual Spring Conference, pp. 240-243.

(11) USNRC Regulatory Guide 1.29, 2007, Seismic Design Classification, U.S. Nuclear Regulatory Commission.

(12) IEEE-344-2004, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power.

(13) JR-317-SJ-442-002, 2014, Procedure for seismic test of CRDM, POSCO PLANTEC.

(14) <http://www.zeus.go.kr>



Myoung-Hwan Choi received his Ph.D. degree from Chungnam National University in 1998. He works as a principal researcher in Korea Atomic Energy Research Institute. His research interest includes the structural vibration and the design of reactivity control system in power and research reactors.



Yeong-Garp Cho received his Master Degree in KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Engineering). He works as a principal researcher in Korea Atomic Energy Research Institute. His research area are the design of reactor structure, reactivity control mechanism, beam tubes, neutron delivery system, and special remote tools in research reactors.