

일체형원자로 제어봉구동장치의 낙하 및 완충특성

Drop and Damping Characteristics of the CEDM for the Integral Reactor

최 명 환† · 김 지 호* · 허 형* · 유 제 용*

M. H. Choi, J. H. Kim, H. Huh and J. Y. Yu

(2010년 5월 3일 접수 ; 2010년 6월 14일 심사완료)

Key Words : CEDM(제어봉구동장치), Drop Test(낙하시험), Damping System(완충장치), Hydraulic Damper(수력댐퍼), Integral Reactor(일체형원자로), Drop Time(낙하시간)

ABSTRACT

A control element drive mechanism(CEDM) is a reactor regulating system, which inserts, withdraws or maintains a control rod containing a neutron absorbing material within a reactor core to control the reactivity of the core. The ball-screw type CEDM for the integral reactor has a spring-damper system to reduce the impact force due to the scram of the CEDM. This paper describes the experimental results to obtain the drop and damping characteristics of the CEDM. The drop tests are performed by using a drop test rig and a facility. A drop time and a displacement after an impact are measured using a LVDT. The influences of the rod weight, the drop height and the flow area of hydraulic damper on the drop and damping behavior are also estimated on the basis of test results. The drop time of the control element is within 4.5s to meet the design requirement, and the maximum displacement is measured as 15.6 mm. It is also found that the damping system using a spring-hydraulic damper plays a good damper role in the CEDM.

1. 서 론

제어봉구동장치(control element drive mechanism; CEDM)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 사용

되어 왔다. 또한 제어봉이탈사고의 가능성이나 원자로 압력용기의 기계적 관통부를 배제하여 원자로의 안전성을 향상시킬 목적으로 원자로 압력용기 내부에 구동장치를 배치하는 in-vessel CEDM이 연구 개발되기도 하였다⁽¹⁾. 국내·외의 가압경수로형 상용원자로에는 주로 모터로 구동되는 래치형 마그네틱 잭(latch-type magnetic jack) 방식의 구동장치가 사용되고 있다. 또한 조사시험이나 동위원소생산 등을 목적으로 하는 연구용 원자로에는 주로 전자석을 이용한 모터구동방식이 이용되고 있으며, 수압을 이용하여 제어봉을 구동하는 원자로도 운영되고 있다^(2,3).

국내에서는 다목적 연구로인 하나로(HANARO)가 1995년부터 정상가동되고 있는데, 원자로 수조 상부에서 모터를 이용하여 구동되는 제어봉구동장치를 갖는다⁽⁴⁾. 또한 개발이 진행되고 있는 일체형원자로의 CEDM은 스텝모터로 구동되는 볼스크류형

† 교신저자 ; 정회원, 한국원자력연구원
E-mail : mhchoi@kaeri.re.kr
Tel : (042)868-4799, Fax : (042)868-8622
* 한국원자력연구원

이 논문 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

방식을 적용하고 있는데 스텝모터의 스텝에 따라 스크류의 이동거리가 조절되기 때문에 미세조정성이 매우 우수하다⁵⁾.

대부분의 제어봉구동장치는 원자로 비상 정지를 대비한 제어봉의 긴급삽입 기능을 갖고 있으며, 이는 구동부의 자유낙하로 이루어진다. 이때 CEDM 구동부의 적절한 낙하시간을 결정하고, 최종행정에서의 낙하충격을 줄이며 안전성을 확보하는 것은 설계관점에서 고려해야할 중요한 사항들 중 하나이다. 일체형원자로의 CEDM은 원자로 긴급 정지시 최종행정에서의 충격력을 완화시키기 위하여 코일스프링과 수력댐퍼를 이용한 완충장치가 설계되어 있으며, 기본 성능시험을 수행하였다⁶⁾. 완충장치는 압력용기 내부에 위치하며, 정상 작동중에는 CEDM 내부의 어떤 부품들도 육안 확인이 불가능하다. 따라서 설계 제작된 CEDM의 낙하특성을 파악하고, 완충장치의 기능을 파악하기 위해서는 낙하시험을 통한 정량적인 데이터의 획득이 필요하게 되었다.

이 논문에서는 일체형원자로 제어봉구동장치의 낙하시험을 통하여 낙하시간을 얻고, 설계된 완충장치의 특성과 설계조건 만족도를 평가하고자 하였다. 낙하시험은 모의시험장치와 유체계통을 모사한 시험시설을 이용하여 2차에 걸쳐 수행하였으며, 공간상의 제한으로 제어봉집합체와 연장봉을 무게추로 모사하였다. 낙하 및 완충거동의 측정은 각각 동영상 분석 및 LVDT를 이용하였다. 또한 모사추의 무게, 낙하높이, 수력댐퍼의 유로면적 등이 CEDM의 낙하 및 완충거동에 미치는 영향을 평가하였다.

2. CEDM 및 완충장치 구조

Fig. 1은 일체형원자로 제어봉구동장치 및 원자로 배치에 대한 개념도를 나타내었다. CEDM은 원자로 압력용기 상부의 노즐에 장착되며, 하부에는 연장봉을 통하여 원자로 노심에 위치하는 제어봉집합체와 연결된다. 이 CEDM은 볼스크류형 구동장치로서 스텝모터의 회전운동이 베벨기어를 통하여 볼너트로 전달되며, 볼너트의 회전운동이 볼스크류의 직선운동으로 변환된다. 볼스크류의 하부에는 연장봉과 제어봉집합체가 연결되어 이들을 상하로 구동하는 원리이다. CEDM의 주요 구성부품으로는 압력용기, 모터집합체, 기어집합체, 볼스크류 집합체가 있으며,

이들은 모두 일차 냉각수 내부에서 구동된다.

제어봉구동장치는 원자로 긴급 정지시 스텝모터의 전원을 차단하여 수직 구동부를 낙하시키는 기능을 갖는다. 구동부는 제어봉집합체, 연장봉, 볼스크류집합체 그리고 볼스크류집합체의 상부에 힌지 조인트로 연결된 안내축을 포함한다. 구동부의 낙하시, 최종행정에서의 낙하거동을 멈추기 위한

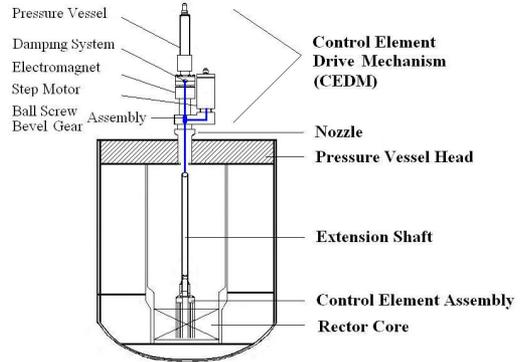


Fig. 1 Schematic view of CEDM for integral reactor

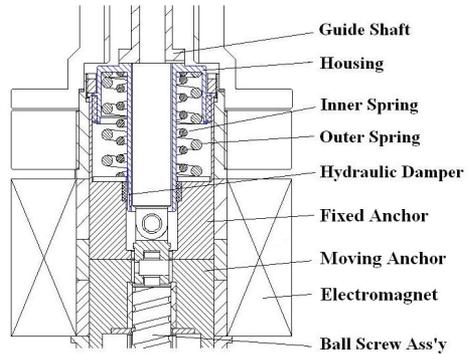


Fig. 2 Damping system of spring-hydraulic damper



Fig. 3 Photo of the damper housing and springs

완충장치의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 완충장치는 상·하부 압력용기가 연결되는 플랜지부에 위치하며, 하우징, 코일스프링, 수력댐퍼로 구성되어 있다. Fig. 3은 제작된 하우징과 스프링의 사진을 나타내었는데, 완충장치 하우징은 안내축과의 충돌시 압력용기 내면과 접촉하며 상하로 움직인다. 이때 거동을 원활하게 하기 위하여 흑연 재료의 마찰베어링을 마찰면에 설치하였다. 스프링은 두개의 코일스프링을 병렬로 설치하여 47.5 N/mm의 강성을 갖도록 하였고, 약 200 kgf의 초기 장착하중으로 압축된 상태로 설치된다. 수력댐퍼는 완충장치 하우징의 축을 테이퍼로 가공하여 유로면적을 조절함으로써 구현하였다. 즉, 구동부의 낙하 최종 행정에서 스프링이 압축되기 시작하면서 하우징은 아래로 이동하고, 고정앵커와 하우징축 사이에 형성된 유로면적이 감소하여 일정 변위 이상에서는 유로가 막혀 유동이 차단되며 완충역할을 하도록 설계하였다.

3. 낙하시험

3.1 시험장치

Fig. 4는 1차 낙하시험에 사용된 모의시험장치의 개략도와 LVDT 설치상태의 사진을 나타내었다. 시험장치는 CEDM을 지지하기 위한 지지구조물, 아크릴 원통, 제어봉을 모사한 무게추, 센서의 설치부 등으로 구성되었다. 지지구조물은 CEDM 본체를 고정할 목적으로 H빔을 이용하여 3단으로 설계, 제작하였는데, 하부에는 무게추를 포함한 아크릴 원통이 위치하고, 상부에는 CEDM 본체가 위치하게 된다. Fig. 1에서 보인바와 같이 CEDM의 볼스크류 하단부에는 연장봉집합체와 제어봉집합체가 연결된다. 그러나 시험장치에서는 공간상의 제한으로 인하여 이들 구조물을 등가의 무게추로 보정하였으며, 3개의 무게추를 이용하여 73~194 kgf의 무게를 모사하였다. 시험장치에서 무게추는 물이 채워진 아크릴 원통 내부에서 움직이기 때문에 낙하거동의 육안확인 이 가능하다.

이 연구에서는 CEDM 내부 유체가 배수되었을 때와 수력댐퍼의 초기 유로면적이 완충특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 2차 낙하시험을 수행하였다. 시험은 고온/고압의 원자로 조건을 구현할 수 있는 시험시설을 이용하였다. 시험 여건상 무게추

부분은 공기중에 노출된 상태에서 무게추의 거동을 측정하여 낙하 및 완충특성을 평가하였다.

제어봉집합체의 낙하거동 및 완충기능의 정량적 데이터를 얻기 위하여 디지털카메라와 LVDT를 사용하였다. CEDM 전 행정에 대한 낙하거동은 무게추의 낙하 동영상을 1초에 30프레임 단위로 기록, 분석하였다. 완충장치의 충격 후 거동은 LVDT를 이용하여 얻었는데, 1차 시험에서는 상부압력용기 최상부, 2차 시험시에는 무게추의 측면에 고정 프레임을 이용하여 부착한 후 변위를 측정하였다. Table 1은 시험에 사용된 LVDT 센서의 기하학적 치수 및 특징을 나타내었다. LVDT는 DCST 1000 model로 body와 core로 구성되며, ±25 mm 범위의 변위를 측정할 수 있고, 400 mV/mm의 민감도를 갖는다.

Table 1 Specification of the LVDT

	Body	Core
Diameter(mm)	ID: 9.35 OD: 20.5	6.35
Length(mm)	212.7	102
Material	Stainless Steel	NiFe
Nominal range	±25 mm	
Sensitivity	400 mV/mm	
Output voltage	±10 Vdc	

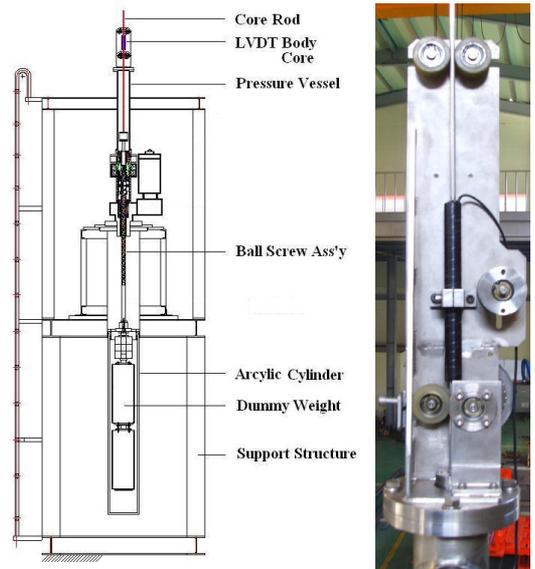


Fig. 4 Schematic view of the drop test rig

3.2 시험방법

CEDM의 낙하시험은 내부에 순수를 채운 후 상온, 상압의 조건에서 스텝모터의 전원을 차단하여 수직 구동부를 낙하시킴으로서 수행하였다.

CEDM의 낙하시간은 디지털카메라를 이용한 동영상 분석을 통하여 얻었다. 동영상 분석은 기준선이 표시된 무게추의 거동을 기준으로 하였으며, Adobe-Premiere 프로그램을 사용하였다. 이때 아크릴 원통 혹은 무게추 측면에는 1.0 cm 단위로 구분 가능한 1.0 m 길이의 자(ruler)를 붙이고, 프레임 단위로 시간과 거리를 읽어 전체 낙하시간을 기록하였다. 따라서 충격 후 거동하는 작은 변위에 대해서는 신뢰성이 떨어지나, 낙하거동을 평가하는 데에는 문제가 없는 것으로 판단되었다. LVDT를 이용한 변위측정을 위하여 core는 CEDM의 초기 장착상태가 LVDT body의 zero점에 위치할 수 있도록 세팅하고 시험을 수행하였다. LVDT의 전압신호는 오실로스코프(oscilloscope)에 저장하였고, 엑셀 프로그램을 이용하여 도시하였다. 이 시험에서는 제어봉집합체의 설계 변수에 따른 영향을 보기 위하여 세 경우의 추무게(73, 127, 194 kgf), 낙하높이(150, 340, 680 mm), 완충장치 하우징의 유로면적 등에 따른 시험을 수행하여 낙하 및 완충특성을 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

이 논문에서는 CEDM의 낙하시험을 통하여 제어봉의 낙하거동 및 완충장치의 기능을 확인하고, 몇몇 변수들이 낙하 및 완충특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

Fig. 5는 127 kgf의 무게추를 낙하한 경우의 LVDT 전압신호를 오실로스코프에서 플롯한 결과로서 1 V는 2.5 mm의 변위를 나타낸다. LVDT 신호는 완충거동에 대한 몇 가지 정보를 포함하는데, 첫째는 충격순간의 속도, 둘째는 낙하 충격에 의한 완충장치의 변위, 마지막으로 감쇠특성 및 감쇠가 마무리되기까지의 시간을 알 수 있다. 이 경우에 초기 낙하 충격으로 인한 최대 변위는 6.24 V(15.6 mm)이고, 스프링의 반발로 인한 변위도 9 mm 발생하였다. 또한 1차 충격보다는 작지만 약 0.7초 후에 이차 충격이 발생한 후에 바로 감쇠되는 특성을 보였다.

Fig. 6은 127 kgf의 무게추를 680 mm 높이에서 낙하한 경우의 낙하곡선으로, 동영상 분석과 LVDT를 이용한 두 변위를 조합한 결과이다. CEDM 구동부는 680 mm의 낙하행정에 대하여 거의 선형적인 변위를 갖고 낙하하며, 충격 후의 완충거동은 일반적인 스프링-댐퍼 시스템의 진동감쇠 특성을 보였다. 그러나 낙하 초기의 거동은 약간의 기울기 변화가 있는데, 그 원인은 스텝모터의 전원 차단후 잔류자력이 존재하기 때문으로 판단된다. 일반적으로 CEDM의 낙하시간은 원자로 노심거리의 약 90%까지 삽입하는데 필요한 시간을 기준으로 평가한다. 그러나 이 연구에서는 무게추가 낙하를 시작하여 초기 장착상태(zero점)까지 걸리는 시간을 낙하시간으로 보았다. 이 경우에 낙하시간은 3.1초이고, 충격과 동시에 스프링이 압축을 시작하여 약 1초 후에는

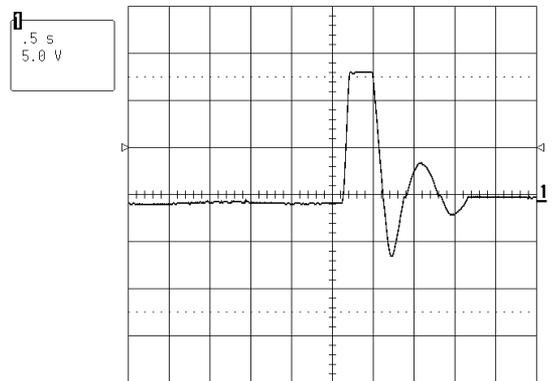


Fig. 5 Typical voltage signal of the LVDT

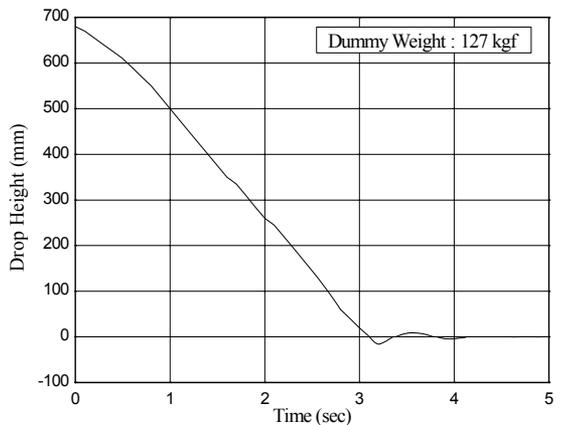
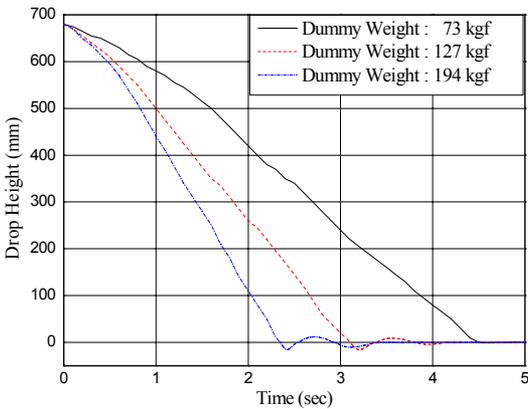


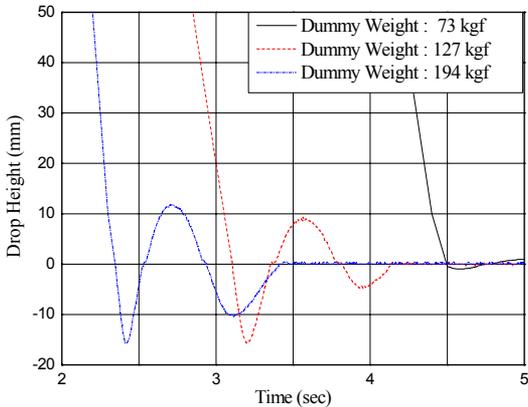
Fig. 6 Whole drop behavior for the dummy weight

감쇠가 끝나 평형상태가 되었다.

일체형원자로에서 CEDM은 여러 개의 제어봉을 하나의 집합체로 구성하여 구동하게 되며, 제어봉의 개수에 따라 집합체의 무게가 약간씩 달라질 수 있다. 따라서 이 시험에서는 제어봉집합체를 모사한 무게추의 무게를 달리하여 영향을 고찰하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 낙하체 무게의 증가는 낙하곡선에서 모터 잔류자력의 영향을 감소시키고 낙하시간을 짧게 하였다. 상대적으로 가벼운 73 kgf 무게추의 경우에 낙하시간은 4.5초로서 원자로의 안전한 정지를 위해 요구된 낙하시간 6.5초를 만족하였다. Fig. 7(b)는 최종행정에서의 충격 후 완충거동을 나타내었다. 무게가 가벼운 경우에 변위는 거의 발생하지 않는데 그 이유는 완충스프링의 초기 장착 하중이 충격하중 보다 크기 때문이다.



(a) Drop behavior



(b) Detail of the damping motion

Fig. 7 Effect of the weight on the drop behavior

Fig. 8은 추의 무게를 127 kgf으로 고정하고 낙하 높이를 달리하여 시험한 결과의 비교를 나타내었다. 낙하시간은 낙하높이의 감소와 비례하여 줄어들고, 안내축이 완충장치 하우징을 충격한 후의 완충거동은 낙하높이와는 무관하게 일정한 결과를 보였다. 즉, 낙하거리에 따른 최대변위는 약 16 mm로 거의 동일하였고, 감쇠되는 시간과 형상도 같은 거동을 보였다. 이러한 결과는 CEDM 내부의 구동부가 낙하할 때 볼스크류와 볼너트가 볼의 접촉으로 움직이게 되는데, 낙하시 속도의 변화가 없이 등속으로 낙하하여 완충장치 하우징에 충격시 거의 같은 운동량을 갖기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 CEDM 압력용기 내부에 물을 채운상태와 배수한 상태에서 자유 낙하한 경우의 결과를 나타내었다. 시험조건의 차이로 인하여 직접적인 비교에는 무리가 있으나, 충수시 1차 시험 결과(Fig. 6)와 비교할 때, 낙하시간은 약간 단축되고 완충거동은 크게 차이가 없었다. 그러나 완충 변위에는 다소 큰 차이를 보였는데, 이는 완충장치 하우징의 유로 면적과 시험조건의 차이에서 발생된 것으로 판단된다. 충수와 배수시의 결과를 비교할 때, 낙하시간은 각각 3.0초와 1.7초로 설계요건을 만족하였고, 낙하속도는 충수시 185 mm/s인데 반하여 배수시에는 475 mm/s로 약 2.5배 빨리 낙하함을 알 수 있었다. 따라서 배수시의 낙하속도 증가는 타 부품에 가하는 충격력을 크게 증가시킬 우려가 있어 CEDM 내부의 충수가 원활하고 안전한 운전을 위해 중요함을 알 수 있다.

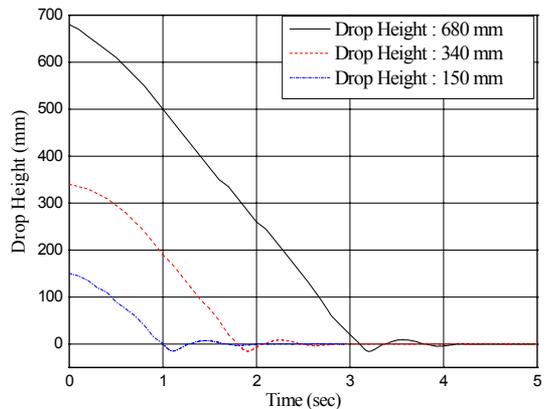


Fig. 8 Effect of the height on the drop behavior

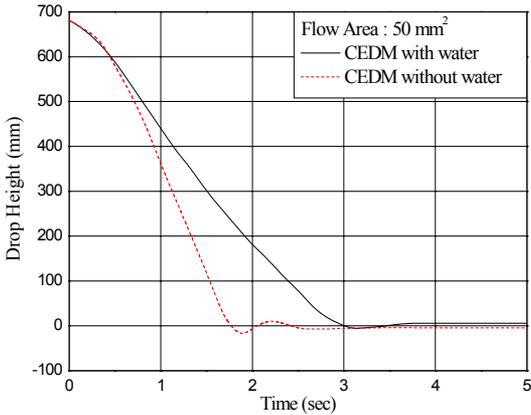


Fig. 9 Drop curve with and without the water

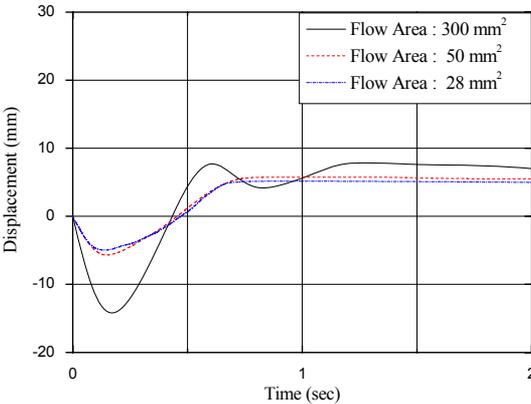


Fig. 10 Effect of the flow area of hydraulic damper

완충장치 수력댐퍼의 유로면적의 영향을 평가하기 위해 각각 28, 50, 300 mm²의 초기 유로면적을 갖는 세 경우에 대한 낙하시험을 수행하였다. Fig. 10은 무게추 148 kgf를 낙하한 경우의 결과로서, 제어봉의 행정거리에 대한 낙하거동은 수력댐퍼와 관계없이 모두 동일하기 때문에 충격 후 완충거동만을 나타내었다. 유로면적이 비슷한 경우에는 최대변위에 약간의 차이가 있을 뿐 거의 동일한 거동을 보였다. 그러나 상대적으로 유로면적이 큰 경우에는 최대변위가 13.7 mm로 많이 증가하였는데, 이는 수력댐퍼의 기능면에서 충격 후 하우징의 움직임이 원활하였기 때문으로 판단된다. 따라서 설계의 관점에서 스프링의 강성과 수력댐퍼의 초기 유로면적에 대한 적절한 조합으로 완충장치를 설계/제작하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

일체형원자로 제어봉구동장치의 낙하거동을 파악하고, 제어봉 긴급 삽입시 구동부 낙하로 인한 충격 완화를 위해 설계된 완충장치의 성능검증하기 위한 낙하시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 볼스크류형 제어봉구동장치의 낙하 특성은 낙하초기 잔류 자력의 영향이 있지만, 전체적으로는 속도의 변화가 없는 등속운동을 한다.

(2) CEDM의 낙하시간은 하중이 증가하거나 낙하높이가 감소함에 따라 짧아지고, 보수적인 경우로서 73 kgf를 낙하하였을 때 4.5초 걸려 설계 요건인 5.6초를 만족하였다.

(3) CEDM 압력용기 내부가 배수된 상태에서 구동부가 낙하하는 경우, 낙하속도는 충수시 보다 약 2.5배 빨라지고 충격력이 커지기 때문에 충수는 CEDM의 안전한 운전에 중요하다.

(4) 수력댐퍼의 초기 유로면적이 커짐에 따라 완충장치의 변위가 증가하며, 설계의 관점에서 스프링의 강성 및 유로면적에 대한 적절한 조합이 필요한 것으로 판단된다.

(5) 스프링과 수력댐퍼를 이용한 완충장치는 CEDM 낙하행정에 대한 낙하로 인한 충격력을 충분히 완충하고 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (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) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.

(5) Kim, J. H., et al., 2004, "Design of Ballscrew Type CEDM for SMART," Trans. of the KNS Spring Meeting.

(6) Choi, M. H., Kim, J. H., Huh, H., Yu, J. Y. and Sohn, D. S., 2009, "Performance Test of the

Damping System Using a Spring-hydraulic Damper," Trans. of the KNS Autumn Meeting.

(7) Jin, C. E. and Kim, C. W., 1997, "Dynamic Interactions between the Reactor Vessel and the CEDM of the Pressurized Water Reactor," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 837~845.