

일체형원자로용 볼스크류형 제어봉구동장치 설계 Design of Ballscrew type CEDM for SMART

김지호, 허형, 이재선, 유제용, 김동욱, 김종인, 지성균
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로에 장착되는 제어봉구동장치는 원자로 기동 및 가열 운전시 미세한 반응도 조절이 가능하도록 스텝모터로 구동되는 볼스크류형으로서 원자로 중앙덮개 상부에 12대가 설치되며 각각의 제어기 작동신호에 응답하여 680mm의 구동범위 내에서 제어봉집합체를 인출, 삽입, 정지 또는 낙하시키는 기능을 수행하도록 설계되었다. 또한 무봉산운전을 하는 일체형원자로에 적합하도록 스텝모터의 한스텝당 제어봉 이송거리가 0.25mm가 되도록 설계하였으며 제어봉의 위치를 노심보호계통에 제공할 수 있도록 리드스위치를 이용하는 4채널의 안전등급 위치지시기가 설치되어 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 가진 볼스크류형 제어봉구동장치의 계통구성, 구동원리, 해체 조립 과정 등의 설계내용을 기술하였다.

Abstract

The design characteristics of ballscrew type Control Element Drive Mechanism(CEDM) which is considered to be mounted on integral reactor is described. The ballscrew type CEDM has the design features of fine step control and high load capacity within a nominal full stroke of 680mm. The step moving length of control element assembly by the step motor is 0.25mm which is a requirement for integral reactor with soluble boron-free operation characteristic. The position indicator using reed switch has 4 channels according to the safety grade sensor requirement.

1. 서론

일체형원자로는 무봉산 운전 특성을 가진 원자로이므로 미세조정 성능이 우수한 제어봉구동장치가 필요하다. 또한 하나의 제어봉구동장치로 구동해야 하는 제어봉집합체의 무게가 크므로 큰 하중을 전달할 수 있어야 한다. 본 논문에서 기술하는 볼스크류형 제어봉구동장치는 이러한 요건을 만족할 뿐만 아니라 스크류가 회전하면서 낙하함에 따라 비상삽입시간이 많이 소요되는 단점을 극복하기 위하여 긴급삽입장치와 해제스프링을 채택함으로써 낙하시간-거리 특성이 안전해석 요건을 만족하도록 설계되었다.

볼스크류형 구동장치가 이용되고 있는 원자로는 Shippingport PWR, Hallam, Enrico-Fermi, Peach Bottom 및 NRU등이 있다. 또 볼스크류 방식의 구동장치는 비상삽입 기능이 좋은 다른 구동장치와 병행하여 사용하기도 하는데 예로서 쉐빙선에 탑재된 러시아의 KLT-40에서는 제어용으로 볼스크류 방식의 구동장치를, 그리고 비상삽입용으로 랙크-피니언 방식의 구동장치를 사용한 바 있다.

김 등[1]은 볼스크류형 제어봉구동장치의 전반적인 설계개념을 발표한 바 있는데 본 논문은 김 등의

논문 내용을 바탕으로 하여 볼스크류형 제어봉구동장치의 계통구성, 구동원리, 해체 조립 과정 등 구체적인 설계내용을 살펴보고자 한다.

2. 볼스크류형 제어봉구동장치 계통구성

일체형원자로의 중앙덮개 상부에는 동일형식의 12대의 볼스크류형 제어봉구동장치가 배치된다. 각 CEDM은 가압기 중앙덮개에 설치된 CEDM 냉각기 노즐 상부에 설치되며 12대의 CEDM 중 6대는 긴급압입 및 조정용으로, 나머지 6대는 정지용으로 사용된다. 각 CEDM은 CEDMCS로부터 신호를 받아 구동된다.

그림 1 및 2에서 보는 바와 같이 제어봉구동장치는 위치지시기 및 한계스위치를 수용하고 있는 상부 압력용기 집합체, 볼스크류집합체, 베벨기어집합체 상,하부완충장치를 포함하고 있는 하부압력용기 집합체, 스텝모터집합체, 수동구동장치 집합체, 배기장치 집합체 등으로 구성되어 있다. 제어봉구동장치의 압력용기 내부는 일차수로 채워지므로 스텝모터의 고정자 및 회전자, 볼스크류 등도 일차수 내부에서 구동되며 냉각재가 아닌 다른 윤활유는 공급되지 않는다.

3. 주요 사양

볼스크류형 제어봉구동장치의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 설계온도 : 350°C
- 설계압력 : 17MPa
- 내부 냉각수 온도 : 120°C 이하
- 제어봉구동속도 : 0~15mm/sec
- 스텝모터 종류[2] : 4상 2여자 방식의 직류 동기성 캔드 모터
- 스텝모터 한 펄스당 회전자 회전각 : 7.5°
- 스텝모터 한 펄스당 제어봉 이동거리 : 0.25 mm
- 안전등급 위치지시기 센서 종류[3] : Reed Switch
- 안전등급 위치지시기 센서 간격 : 20 mm

볼스크류형 제어봉구동장치에는 볼스크류, 볼베어링, 베벨기어 등 동력 전달용 부품이 많이 사용되므로 내부식성이 높으면서도 내마모성, 경도 등이 우수한 재질을 사용하여야 하며 특히 볼베어링은 그 마찰특성이 제어봉구동장치의 성능에 많은 영향을 미치므로 재료선택에 유의해야 한다. 본 논문에서 기술하는 제어봉구동장치에는 STS440C 재질로 제작된 볼베어링을 사용하였는데 Lee 등[4]은 STS440C로 제작된 볼베어링의 마찰특성에 대한 시험을 수행하여 제어봉구동장치의 운전온도인 120°C 이내에서는 볼베어링이 안정적으로 작동됨을 보인 바 있다[4].

제어봉구동장치의 압력용기는 원자로 냉각재 압력경계의 일부이므로 KEPIC 코드 MN[5]의 등급 1 압력용기에 대한 요건에 따라 설계되었다. 위치지시기는 제어봉의 위치를 노심보호계통에서 전달하는 안전등급 센서로서 4채널로 구성되어 있으며, IEEE 1E 등급으로 분류되어 IEEE 323[6] 및 344[7]의 환경시험에 적합하도록 설계되었다.

4. 구동원리

볼스크류형 제어봉구동장치는 스텝모터에 의해서 구동되며 스텝모터의 회전력이 베벨기어를 통하여 스플라인으로 전달되고 스플라인의 회전력은 스플라인과 연결된 볼너트에 전달되며, 볼너트의 회전력이 스크류의 직선 왕복운동으로 변환되어 연장봉을 통하여 스크류와 연결된 제어봉을 상하로 구동하게 된다. 일체형원자로에서 볼스크류형 제어봉구동장치는 다음과 같은 3개의 운전모드로 크게 나뉘어진다.

- 운전준비위치 운전모드
- 정상운전모드
- 비상삽입 운전모드

운전준비위치는 긴급삽입장치의 전자석이 여자된 상태에서 이동앵커가 고정앵커에 붙어 있고 위치지시기 영구자석이 0위치에 있는 상태를 의미한다. 운전준비위치까지 구동하기 위해서는 스텝모터를 제어봉이 삽입되는 방향으로 구동한다. 이렇게 되면 볼스크류 집합체는 매우 큰 초기스프링하중을 가지고 있는 상부완충장치에 얹혀 있는 상태이므로 스크류가 내려가는 대신 스프링 하중보다 가벼운 이동앵커-볼너트-스플라인 집합체가 상승하게 된다. 이동앵커-볼너트-스플라인 집합체가 긴급삽입거리인 68mm 만큼 상승하면 긴급삽입장치의 상부한계스위치가 ON되고 전자석의 힘으로 이동앵커가 고정앵커에 붙는다. 이 상태에서 스텝모터를 정지하면 운전준비위치까지의 운전이 완료된다.

정상운전모드는 원자로가 정상운전중일때 출력조절을 위하여 제어봉을 상하로 이동시키는 운전모드로서 주제어실에서 명령을 받은 CEDMCS의 펄스수에 의해 0.25mm/sec의 속도로 상하 이동 운전을 하게 된다. 이동거리 및 제어봉의 위치는 펄스카운터에 의해 제어된다.

비상삽입 운전모드는 스크램시 제어봉을 긴급히 노심에 삽입하는 운전모드이다. 스크램 신호가 들어오면 CEDMCS에서 공급되는 전자석 및 스텝모터에의 전원공급이 차단되는데, 전자석에의 전원이 차단되면 이동앵커가 고정앵커로부터 이격되고, 이에 따라 이동앵커-볼너트-스플라인 집합체, 스크류, 제어봉 집합체 등 모든 가동부가 볼너트의 회전없이 가동부 자중 및 해제스프링의 힘으로 초기 노심제어를 위한 노심요건인 긴급삽입거리 68mm 만큼 낙하하게 된다. 이처럼 볼너트의 회전을 동반하지 않은 낙하는 스프라인에 의해서 가능하게 된다. 긴급삽입 이후에는 자중 및 해제스프링의 힘으로 볼너트의 회전에 의해 스크류가 노심에 삽입되며 스텝모터의 회전자도 함께 공회전을 하게 된다.

비상삽입 모드에서 제어봉의 낙하거리-시간 곡선은 안전해석의 중요한 입력자료인데 제어봉의 낙하 특성은 예측하기 어려운 여러 가지 변수의 함수로서 시험을 통해서 측정되어야 할 값이지만 시험이 수행되지 않은 상태에서는 보수적인 가정을 도입하여 낙하시간을 산출할 수 있다. 제어봉집합체의 낙하속도(V_D)는 과도상태 없이 진행정에서 등속이라 가정하여 다음과 같이 유체속에서 등속낙하하는 물체의 힘평형방정식을 사용하여 산출할 수 있다.

$$\text{평형방정식: } F_G + F_S = F_B + F_F + F_D$$

- 여기서, F_G : 수직 가동부 중량 (981N)
 F_S : 해제스프링 평균 복원력 (1170N)
 F_B : 일차냉각재에 의한 부력 (100N)
 F_F : 가동부 마찰 저항력 (176N, 가정)
 F_D : 유체저항력 ($=C_D V_D$, 속도비례항력 가정)
 C_D : 비례항력계수 (15kNs/m, 가정)

이와 같은 방법으로 낙하거리-시간 곡선을 그리면 그림 3과 같다.

5. 해체 조립

제어봉구동장치는 원자로용기 중앙덮개를 제거하거나, 역으로 원자로용기 중앙덮개를 원자로에 설치하는 경우에 제어봉구동장치만을 제거 혹은 설치하는 것이 가능하도록 가압기 안내관내에서 스크류와 연장봉집합체와의 연결을 끊을 수 있도록 설계되어 있다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 원자로 중앙덮개 냉각기 위에 4개의 스티드볼트 및 너트로 고정되며 단면이 사각인 환형 구리가스켓을 사용하여 밀봉한다. 제어봉구동장치를 설치하기 위해서는 먼저 12개의 연장봉집합체가 제어봉집합판에 체결되고, 이 상

태에서 해제스프링이 장착되어 있는 가압기가 원자로에 설치되어 있어야 한다. 이 상태에서 제어봉구동장치는 다음순으로 설치한다.

- 1) 상부압력용기 해체
- 2) CEDM을 제 위치에 정렬하고 냉각기 위에 스테드볼트, 너트로 고정한다.
- 3) 상부완충장치 압축장비를 사용하여 상부완충장치를 최대한 압축시킨다.
- 4) 스크류 상단의 안내베어링 부를 조절하여 스크류하단의 bayonet joint를 연장봉집합체 상부에 체결한다.
- 5) 상부완충장치 압축장비를 제거한다.
- 6) 상부압력용기를 설치한다.
- 7) 케이블을 연결한다.

상부완충장치 압축장비를 제거하면 상부완충장치 스프링이 초기 장착 상태에 놓이게 되면서 제어봉집합체를 포함한 모든 가동부를 약 26mm 만큼 들어 올리게 되는데 이 거리는 제어봉 비상낙하시 상부완충장치의 최대 행정에 해당되며 제어봉집합체의 비상낙하시 하부 제어봉집합판이 상부 제어봉안내관을 치는 상황을 배제하도록 해준다.

6. 결론

일체형원자로에 장착되는 볼스크류형 제어봉구동장치의 설계 내용을 소개하였다. 볼스크류형 제어봉구동장치는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 볼스크류형 제어봉구동장치는 스텝모터의 한 스텝당 제어봉의 이동거리를 0.25mm 로 하여 미봉산 운전노심인 일체형원자로에 적합하다.
- 일체형원자로의 모든 운전모드에 안정적으로 작동하며 비상삽입시간 또한 안전해석의 요건을 만족한다.
- 4채널의 위치지시기를 채택함으로써 안전등급 센서요건을 만족한다.

본 논문에서 살펴본 볼스크류형 제어봉구동장치는 일체형원자로에 적합하게 구동되도록 설계되었지만 성능을 검증하기 위한 시험이 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김지호 외, "SMART CEDM용 회전형 스텝모터의 성능시험", 2001년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 2001.10.
- [2] 허형 외, "The Design, Characteristic Experiment of Rotary Step Motor for Ball screw Type CEDM", 2003년 한국원자력학회 춘계 학술발표대회 논문집, 2003.5.
- [3] 유제용 외, "볼스크류형 CEDM용 제어봉 위치지시기의 예비 성능시험", 2003년 한국원자력학회 춘계 학술발표대회 논문집, 2003.5.
- [4] J.S.Lee, et al. "Frictional Characteristics of stainless steel ball bearings lubricated with hot water", KSTLE International Journal, 2003.12.
- [5] KEPIC MNB, 2000 Edition.
- [6] IEEE Standard 323-1983, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.
- [7] IEEE Standard 344-1987, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

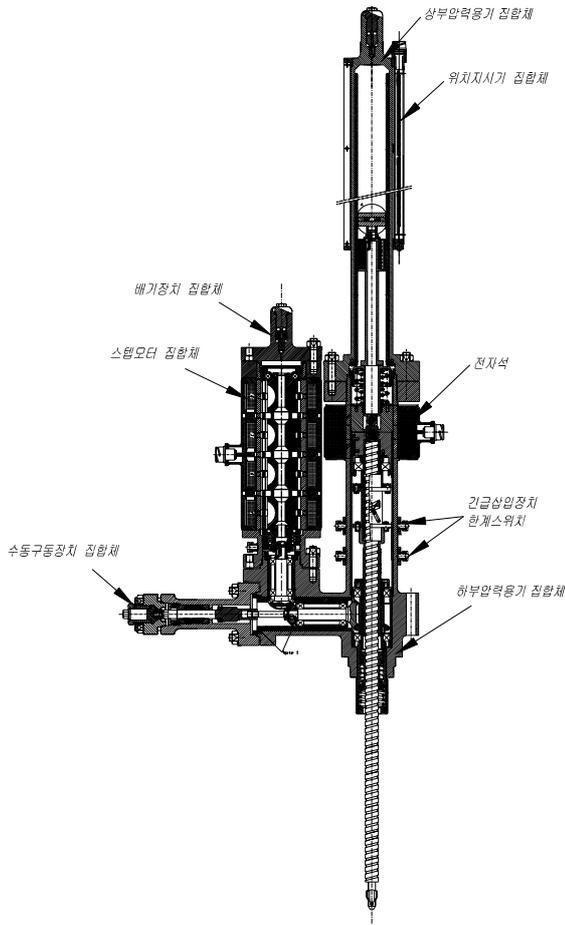


그림 1 제어봉구동장치 집합체

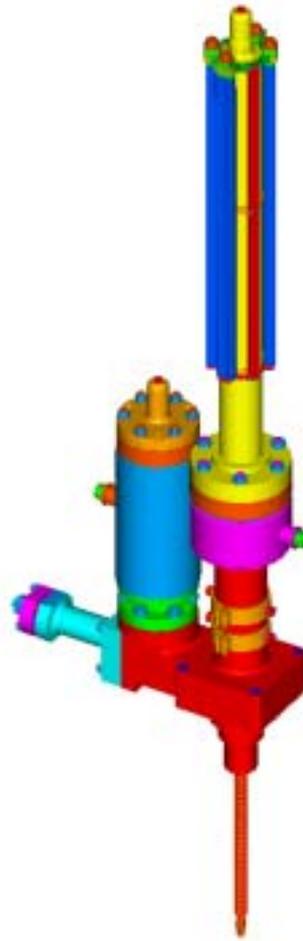


그림 2 제어봉구동장치 3차원 모델

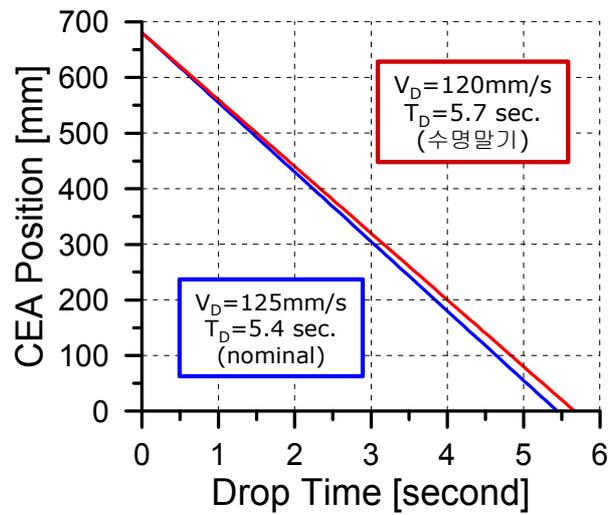


그림 3 제어봉 낙하거리-시간