

SMART용 볼스크류형 제어봉구동장치 설계

김지호, 허형, 이재선, 유제용, 김동욱, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART의 선형펄스모터형 제어봉구동장치(CEDM)의 대안으로 검토되고 있는 볼스크류형 CEDM의 기본설계 내용을 기술하였다. 볼스크류형 CEDM은 미세조정성이 매우 우수할 뿐만 아니라 큰 하중을 전달 할 수 있으므로 일체형원자로의 제어봉구동장치로서 적합하다. 또한 본 연구를 통해 개발된 볼스크류형 CEDM은 긴급삽입장치 및 해체스프링을 개발, 장착함으로써 비상삽입능력을 획기적으로 향상시켰으며 스텝모터의 고정자를 내부고정자 및 외부고정자로 분리함으로써 작은 크기로도 큰 토크 특성을 낼 수 있도록 하였다. 또한 설계된 제어봉구동장치의 모든 부품을 3차원 모델링하여 조립과정을 모사 함으로써 조립시 발생될 수 있는 문제점들을 설계단계에서 찾아내어 설계변경을 함으로써 효율을 증대시켰다.

Abstract

The basic design characteristics of ballscrew type CEDM which has been considered as an alternative of SMART CEDM is described. The ballscrew type CEDM has the design features of finer step control and higher load capacity. The present CEDM has an improved emergency shutdown capacity by adapting a quick insertion system with release springs. The rotary step motor is designed to have high holding torque in small space by separating the stator into two parts, inner and outer. Three dimensional modelling of every part in CEDM has been also performed to simulate the assembly process and to minimize the trial and error during fabrication stage.

1. 서론

일체형원자로 SMART에 사용될 제어봉구동장치의 하나로 개발되고 있는 볼스크류형 제어봉구동장치는 회전형스텝모터의 회전운동이 베벨기어를 통하여 볼너트로 전달되고 볼너트의 회전운동이 스크류의 직선운동으로 변환되어 스크류와 연결되어 있는 제어봉을 상하로 구동하는 원리를 가진 제어봉구동장치이다. 볼스크류형 제어봉구동장치의 주요 구성부품은 볼스크류 집합체, 회전형스텝모터, 위치지시기, 초음파 위치 측정기, 수동구동장치, 배기장치, 감속기어, 압력용기 등이다. 압력용기 내부는 냉각재로 채워지므로 스텝모터의 회전자, 볼스크류 등도 냉각재 내부에서 구동되며 냉각재가 아닌 다른 윤활유는 공급되지 않는다.

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 쇠빙선에 탑재된 러시아의 KLT-40에서는 제어용으로 볼스크류 방식의 구동장치를, 그리고 비상삽입용으로 랙크-피니언 방식의 구동장치를 사용한 바 있다.

볼스크류형 제어봉구동장치의 특징은 스텝모터의 스텝에 따라 스크류의 이동거리가 조절되므로 미세 조정성이 매우 우수하며 또한 다른 제어봉구동장치에 비해 큰 하중을 전달할 수 있다는 것이다. 스텝모터 대신 미세조정기에 적합한 서보모터를 사용하는 개념도 가능하다. 이러한 특성 때문에 볼스크류형 제어봉구동장치는 무봉산 운전 및 제어봉 인출에 의한 기동 등의 요건에 따라 미세조정성이 특히 우수한 제어봉구동장치가 필요한 일체형원자로에 적합하다.

볼스크류형 제어봉구동장치 개발과 관련된 기존의 연구결과를 보면 김 등[1]은, 볼스크류형 제어봉구동장치의 안정성 확보를 위한 스텝모터의 설계요건을 동특성 관점에서 해석한 바 있으며, 유 등[2,6]은 볼스크류형 제어봉구동장치에 장착할 수 있는 위치지시기 및 한계스위치를 개발한 바 있다. 또한 조 등[3]은 전자석의 추력 시험을 수행하여 그 결과를 발표한 바 있고 이 등[4,5]은 주요 재질에 대한 마찰 특성 및 볼스크류의 피로특성을 연구한 바 있다. 허 등[7]은 초음파 센서를 이용하여 위치측정용 센서를 개발하였고 김 등[8]은 스텝모터의 시제품을 제작하여 성능시험을 수행한 내용을 발표한 바 있다.

본 논문에서는 SMART 제어봉구동장치의 설계요건을 분석하고 상기의 연구결과를 바탕으로 기본설계된 볼스크류형 제어봉구동장치에 대해 설명하고자 한다.

2. 볼스크류형 제어봉구동장치 설계

2.1 설계요건

볼스크류형 제어봉구동장치의 주요설계요건은 다음과 같다.

- 계통 요건

- o 설계 압력 : 17.0 MPa
- o 설계 온도 : 350°C
- o 운전중 압력 : 14.7 MPa
- o 운전중 내부 냉각재 온도 : 120°C 이하

- 볼스크류형 CEDM은 30년의 설계수명을 가지며 소모성 부품은 주기적인 교체가 가능하도록 설계되어야 한다.

- 제어봉구동장치의 압력경계에 해당되는 부품들은 안전등급 1의 모든 요건을 만족하도록 설계, 제작, 건설되어야 한다.

- 원자로정지 및 제어봉집합체의 빠른 삽입에 필요한 부품 및 연장봉집합체는 안전등급 2의 모든 요건을 만족하도록 설계, 제작, 건설되어야 한다.

- 제어봉구동장치의 위치지시기는 안전등급 3의 모든 요건을 만족하도록 설계, 제작, 건설되어야 한다.

- 압력용기를 구성하는 부품, 위치지시기능을 제공하는 부품, 제어봉집합체의 빠른 삽입을 위해 필요한 부품 및 연장봉은 내진등급 I 로 분류된다.

- 위치지시기는 IEEE 1E 등급의 부품이다.

- 제어봉구동장치는 가동중에 여러 가지의 가진상태에 놓이게 되기 때문에 주요한 계통의 가진주파수와 이들 구조물의 고유진동수가 일치하지 않도록 설계되어야 한다. 주요한 계통의 가진주파수에서 생기는 동적응답을 설계시 반영하여야 한다.

- 모든 제어봉구동장치는 원자로용기 중앙헤드 위에 배치되도록 설계되어야 하며 설치시 제어봉구동장치간 서로 간섭이 없도록 설계되어야 한다.
- 제어봉구동장치는 원자로용기 중앙헤드를 제거하기 전, 구동축과 연장봉과의 연결을 끊을 수 있어야 하며, 역으로 원자로용기 중앙헤드를 원자로에 설치후 구동축과 연장봉을 연결할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 볼스크류형 CEDM은 원자로 초기 충수시 CEDM 내부의 공기를 빼낼 수 있는 배기 기능을 가지고 있어야 한다.
- 볼스크류형 CEDM은 예상치 못한 사고로 인해 스텝모터만으로도 동작이 불가능한 상황이 발생하는 경우, 수작업으로 스크류를 수동 구동할 수 있는 기능을 보유하여야 한다.

2.2 계통구성

그림 1에서 보는 바와 같이 제어봉구동장치는 볼스크류 집합체, 위치지시기 및 한계스위치를 수용하고 있는 상부압력용기 집합체, 하부압력용기 집합체, 스텝모터, 감속기어, 긴급삽입장치, 완충장치, 연결봉집합체, 해제스프링 집합체 수동구동장치, 배기장치 등으로 구성되어 있다. 제어봉구동장치를 구성하는 각 부품의 설계개념은 다음과 같다.

볼스크류 집합체

볼스크류 집합체의 주요 부품은 스크류와 볼너트, 볼베어링, 스플라인, 안내베어링 등이다. 스크류의 위쪽에는 상부용기의 설치오차 등에 의한 굽힘 하중이 스크류로 직접 전달되는 것을 방지하기 위하여 스크류 상단에 이동안내를 위한 안내축을 힌지조인트로 연결하며, 또한 이 안내축은 스크류의 회전방지 및 상하이동중의 마찰저항 감소를 위한 가이드베어링과 연결되어 있으며 이 가이드베어링에양쪽에는 홈이 있고 이 홈이 상부용기 내벽에 설치된 베어링가이드를 따라 움직이게 된다. 볼은 스크류 그루브를 따라 3회 반 회전후, 볼 이송튜브를 통해 볼너트의 위, 혹은 아래로 이송된다. 스크류의 피치는 15mm이며 볼 회전중심 직경은 30mm이다.

스크류의 하단에는 연결봉과의 연결 및 해체에 적합한 bayonet 연결장치가 붙어있다. 볼너트의 볼이 구동하는 내부에는 외부로부터의 이물질이 침입하는 것을 방지하기 위하여 볼너트 상하에 이물질차단베어링을 설치하는데 이 베어링의 한쪽면은 스크류의 groove에 물리도록 설계되어 있다.

회전형스텝모터 집합체

회전형스텝모터는 4상 가변 릴럭턴스형 스테핑 모터로서 자체밀봉이 필요없는 Canned Motor 형태이다. 스텝모터집합체는 밀봉용기 및 용기내부에 용기의 일부로 만들어진 외부 고정자 치, 그리고 독립적인 4상의 권선으로 이루어진 외부 고정자, 용기중심에 들어 있는 내부 고정자, 두 고정자 사이에 들어 있는 회전자로 구성되어 있다. 권선은 압력용기(외부고정자 치)를 감고 있는 형태이며 고정자 및 회전자 치는 12개로 이루어져 있다. 또한 외부 고정자 권선은 모두 압력용기의 외부에 설치되므로 일차수가 직접 닿지 않으며 외부고정자 권선블럭이 있는 공간은 다시 얇은 스테인리스 스틸로 된 용기로 덮고 밀봉한다.

압력용기의 역할도 하는 외부고정자 치구조물은 자계의 형성을 원활히 하기 위하여 각 상권선 사이를 비자성 용접재로 용접하며 유니폴러형 자계가 형성된다. 회전자와 고정자의 치(齒)는 다단식 구조로서 각 상당 2단씩 모두 4개의 상으로 구성되어 있으며 모든 상이 동일 피치로 되어 있으나 회전자의 각 상은 인접 상과 7.5°의 위상각을 가지고 있다. 따라서 스텝모터 한 펄스당 회전자 회전각은 7.5°가 된다. 회전자는 실린더 형으로서 비자성체와 자성체가 번갈아 용접되어 있다. 이 스텝모터는 상하방향 네 개의

권선중 이웃한 두개의 권선에 번갈아 여자함으로써 구동되는 2여자 방식이다.

스텝모터 회전축 하부에는 스텝모터의 1스텝 회전을 감지할 수 있는 초음파 센서가 설치되어 있다. 이 초음파 센서의 대상체는 48개의 치로 구성되어 있어서 스텝모터의 매 스텝당 회전을 감지할 수 있다.

위치지시기 집합체

각 CEDM에는 4대의 RSPT(Reed Switch Position Transmitters)가 독립적으로 설치되어 있다. 압력용기 내부에는 볼스크류 집합체의 안내베어링 상부에 스크류와 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있으며 이 영구자석의 위치에 비례하여 압력용기 외벽에 설치된 RSPT는 계단식 아날로그 전압신호를 출력한다. 위치지시기는 제어봉의 위치를 20mm 간격으로 감지할 수 있도록 설계되어 있으며 운전중 위치지시기 집합체 내의 리드스위치는 항상 두 개 또는 세 개가 닫히게 된다. 위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출력된다. 4개의 RSPT는 2개가 한조가 되어 알루미늄으로 제작된 2개의 위치지시기 홀더에 각각 장착되며 이 위치지시기 홀더는 압력용기 외벽을 감싸는 형태로 장착된다.

한계스위치

4대의 위치지시기에는 제어봉의 상한, 하한을 지시할 수 있는 비안전등급의 상부한계스위치, 하부한계스위치가 위치지시기 센서와 독립적으로 설치되어 있다. 또한 스텝모터의 전원이 차단되어 제어봉이 가동부 자중에 의해 최하한의 위치에 있는 경우, 이를 감지할 수 있는 제어봉 낙하 스위치가 4채널 설치된다.

긴급삼입장치

제어봉구동장치에는 스크램신호가 들어오면 볼너트의 회전없이 제어봉 집합체가 일정거리 만큼 긴급히 수직 하강할 수 있는 긴급삼입장치가 설치되어 있다. 긴급삼입장치는 고정앵커, 이동앵커 및 권선블럭으로 이루어진 전자석, 이동앵커와 볼너트를 연결해주는 볼베어링, 베벨기어의 회전력을 볼너트에 전달하고 스크류의 수직방향 이동을 자유롭게 해 주는 스플라인, 그리고 긴급삼입장치의 완전인출/삼입 여부를 감지하기 위한 상,하부 한계스위치로 구성되어 있다.

전자석 권선은 하나의 권선이 고장날 것을 대비하여 두 조로 구성되어 있다. 초기기동시 스텝모터의 회전력이 감속기어를 통하여 볼너트집합체(볼너트-스플라인-볼베어링집합체)로 전달되면 볼너트집합체가 상승하게 된다. 일정거리 만큼 상승하면 볼너트집합체의 상단에 붙어있는 이동앵커가 전자석의 고정앵커에 붙게 되며 이 이후로는 스텝모터의 회전축의 회전운동이 스크류의 상하운동으로 바뀌게 된다. 스크램시에는 이 전자석에의 전원을 차단함으로써 전자석의 힘만으로 매달려 있던 볼너트집합체가 스크류와 함께 가동부위의 자중 및 해제스프링의 힘으로 볼너트의 회전없이 수직 낙하하여 노심을 제어하게 된다.

감속기어

감속기어는 스텝모터의 회전력을 볼너트로 전달하는 역할을 하며 기어비는 1:1.25 이다. 수직회전축과 수평회전축으로 분리되어 있으며 베벨기어를 통하여 연결되어 있고 수직기어의 상부는 스텝모터 회전축과, 그리고 수평기어의 한쪽은 볼스크류집합체의 베벨기어와 연결된다.

상부완충장치

비상시 스크류를 포함한 모든 가동부가 자유낙하할 때, 스크류 최종행정에서 충격에 의한 제어봉구동

장치의 손상을 방지하기 위하여 최종행정의 위치에 상부 완충장치를 설치한다. 상부완충장치는 수력댐퍼 및 내외부 스프링으로 구성되어 있으며 이 스프링은 가동부의 자유낙하 하중을 고려하는 경우에도 완전압축상태가 되지 않도록 설계된다. 상부완충장치 스프링의 최대 행정은 CEDM 체결시 스크류와 연장봉이 연결될 수 있도록 결정해야 한다. 초기 체결시에는 용기가 상하로 움직일 때의 압력용기 내면과의 마찰을 줄이기 위하여 마찰베어링을 마찰면에 설치한다.

하부완충장치

스크램시 긴급삽입장치 전자석의 전원이 차단되면 볼스크류를 포함하는 모든 가동부위가 자중 및 해제스프링의 힘으로 급속하게 삽입된다. 이때 떨어지는 충격에 의한 제어봉구동장치의 손상을 방지하기 위하여 스플라인 낙하 행정 하부에 하부완충장치를 설치한다. 상부완충장치와 마찬가지로 용기가 상하로 움직일 때의 마찰을 줄이기 위하여 마찰면에 마찰베어링을 설치한다.

압력용기

볼스크류형 제어봉구동장치의 압력용기는 상부압력용기, 하부압력용기, 스텝모터 용기 및 수동구동장치 용기 등 네 부분으로 구성되어 있다. 상부압력용기는 외부에 위치시기가 설치되어 있고 내부에는 스크류의 이동안내를 하는 베어링 가이드가 설치되어 있다. 하부압력용기는 볼스크류집합체, 긴급삽입장치 및 감속기어를 수용하고 있으며 제어봉구동장치를 냉각기 위에 설치할 수 있는 플랜지 구조를 가지고 있다. 모든 용기는 스테드볼트, 너트로 연결되며 구리로 된 가스켓에 의해서 밀봉된다. 스텝모터 용기는 모터의 외부고정자 역할도 수행하므로 여러개의 원환형 자성체 링 사이에 비자성체 링을 용접하여 제작된다. 하부압력용기의 전자석이 설치되는 부위에도 원할한 자장 형성을 위하여 용기의 일부를 자성체 링으로 용접하여 제작한다.

해제스프링 집합체

스크램시는 제어봉이 노심 내부로 급속히 삽입되어야 하는데 가동부위의 자중만으로는 스크류를 빠른 속도로 하강시킬 수 없으므로 원자로내 가압기 내부에 해제스프링을 설치한다. 이 스프링은 정상운전시 항상 압축상태에 있게 된다. 반대로 꼬여 올라가는 서로 다른 두 개의 스프링으로 구성되어 있으며, 압축시 스프링의 비틀림 현상을 최소화하기 위하여 상하방향으로 네 개의 스프링으로 분리되어 있다. 스프링이 압축될 때 스프링 끝단의 위치이동을 자유롭게 하기 위하여 상하방향 각 스프링 사이에 자유로이 움직일 수 있는 스프링가이드를 설치한다. 이 스프링 가이드는 스프링 압축시의 비틀림 현상을 방지하는 역할도 한다. 해제스프링은 또한 원자로가 뒤집히는 사고에서도 제어봉을 삽입할 수 있도록 설계된다.

연결봉 집합체

연결봉 집합체는 스크류와 연장봉을 연결해주는 역할을 하며 상,하부에 bayonet 구조를 가지고 있다. 연결봉 내부에는 체결봉이 들어 있으며 하단에는 체결봉을 제 위치에 정렬해주는 스프링이 들어 있다. 또한 연결봉 외벽에는 스텝모터 제어시스템의 이상으로 제어봉이 규정된 행정 이상의 과도한 상승을 하는 경우, 이를 차단하여 제어봉구동장치의 손상을 방지할 수 있는 정지턱을 가지고 있다.

수동구동장치

제어봉구동장치 내부의 예기치 못한 고장으로 스텝모터만으로는 구동이 불가능한 경우를 대비하여 수평베벨기어축과 연결하여 사용할 수 있도록 수동구동장치가 설치되어 있다. 이 수동구동장치의 축은 정상 운전시에는 수평베벨기어축과 분리되어 있지만 수동구동이 필요한 경우 수동구동장치의 상부 너트를

풀면 내부압력에 의해 수동구동축과 수평베벨기어축이 결합되므로 외부에서 작업자에 의해 볼스크류의 강제회전이 가능하게 된다.

배기 장치

제어봉구동장치의 상부압력용기 및 스텝모터의 상부에는 원자로의 초기 냉각재 충수후 제어봉구동장치 내부에 결집되는 공기를 제거하기 위한 배기장치가 설치되어 있다.

2.3 3차원 모델링

설계된 제어봉구동장치의 개념성립성을 컴퓨터 모사를 통하여 검증하기 위해 CAE 및 CAD 전문 소프트웨어인 I-DEAS 코드를 이용하여 3차원 모델링을 수행하였다. 이러한 부품모델로부터 조립모델을 만들어 부품간 간섭을 조사하고 조립과정을 simulation 함으로써 조립시 발생하는 문제점들을 설계단계에서 찾아내어 설계변경을 함으로써 효율을 증대시킬 수 있다. 또한 3차원 솔리드 모델로부터 간단한 drafting 작업을 통하여 설계도면을 자동 생산함으로써 도면생산시간을 획기적으로 단축할 수도 있다. 그림 2는 볼스크류형 제어봉구동장치의 3차원 모델을 보이고 있다.

3. 기본설계 사양

이와 같은 설계요건에 따라 기본설계된 볼스크류형 제어봉구동장치의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 설계온도 : 350°C
- 설계압력 : 17MPa
- 내부 냉각수 온도 : 120°C 이하
- 제어봉구동속도 : 0~15mm/sec
- 스텝모터 종류 : 4상 2여자 방식의 직류 동기성 캔드 모터
- 스텝모터 홀딩토크 : 22 N-m
- 스텝모터 한 펄스당 회전자 회전각 : 7.5°
- 스텝모터 한 펄스당 제어봉 이동거리 : 0.25 mm
- 안전등급 위치지시기 센서 종류 : 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 한다. 이러한 특성을 고려하여 선정된 주요부품의 재질은 다음과 같다.

- 압력용기, 내부구조물 : STS 321
- 내부구조물중 자성체 : STS 430
- 외부구조물중 자성체 : S20
- 볼스크류, 스티드 볼트 : Incoloy 925
- 스프링 : Inconel X750
- 권선 : 폴리 이미드
- 볼베어링, 볼너트, 베벨기어 : STS 440C
- 마찰베어링 : Superple PVX100

4. 결론

볼스크류형 제어봉구동장치의 기본설계를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 볼스크류형 제어봉구동장치는 스텝모터의 한 스텝당 제어봉의 이동거리를 1mm 이내까지 설계할 수 있으며 현 설계된 제어봉구동장치의 스텝당 이송거리는 0.25mm 이다.

- 본 설계에서 개발된 회전형 스텝모터는 고정자를 내부고정자, 외부고정자로 분리함으로써 작은 크기에도 큰 토크 특성을 보인다. 현설계된 회전형 스텝모터의 최대 홀딩토크는 22Nm 이상이다.

- 긴급삽입장치 및 해제스프링을 개발함으로써 그동안 볼스크류형 제어봉구동장치의 단점으로 인식되었던 비상 삽입능력을 획기적으로 향상시켰다.

- 새롭게 개발된 볼스크류형 제어봉구동장치는 해석적으로는 성능이 우수함이 입증되었지만 같은 형태의 제어봉구동장치가 사용된 사례가 없으므로 원형을 제작하여 검증시험을 수행하여야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김동욱 외, "일체형원자로 제어봉구동장치의 안정성 확보를 위한 스텝모터 설계요건 해석", 1999년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 1999.10.

[2] J.Y.Yu et. al. "Development of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive Mechanism for SMART", ICONE-9, 2001.4.

[3] 조대회 외, "SMART CEDM의 전자석의 시험", 2001년 한국원자력학회 춘계 학술발표대회 논문집, 2001.5.

[4] J.S.Lee et. al. "Thermal Friction Characteristics of stainless Steel Bearings", 2nd World Tribology Congress, 2001. 5.

[5] 이재선 외, "SMART CEDM의 볼스크류의 피로수명 평가", 2001년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 2001.10.

[6] 유제용 외, "SMART CEDM용 위치지시기에서 영구자석과 리드 스위치의 배열", 2001년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 2001.10.

[7] 허형 외, "SMART CEDM용 초음파 센서 위치측정기의 시험 및 설계", 2001년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 2001.10.

[8] 김지호 외, "SMART CEDM용 회전형 스텝모터의 성능시험", 2001년 한국원자력학회 추계 학술발표대회 논문집, 2001.10.

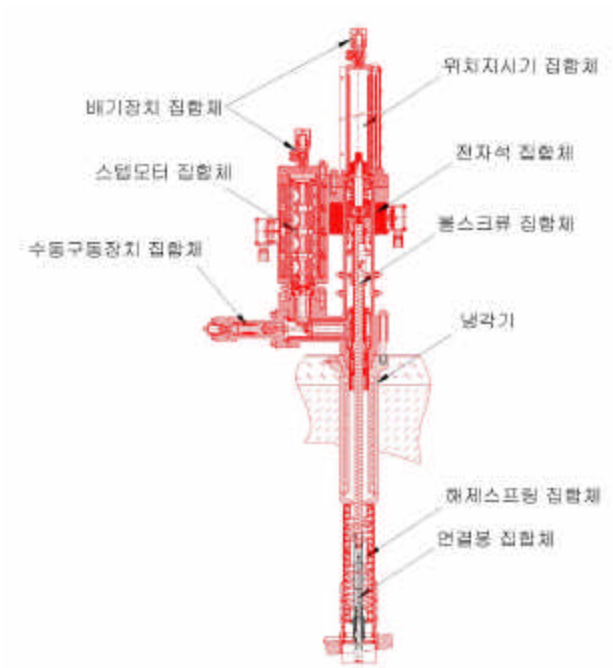


그림 1 볼스크류형 제어봉구동장치 집합체

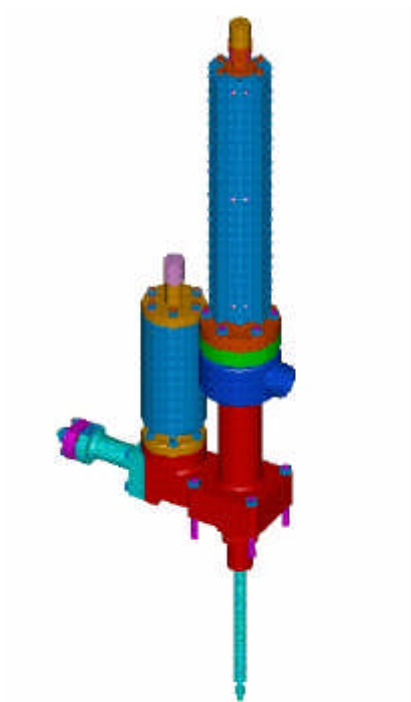


그림 2 볼스크류형 제어봉구동장치 3차원 모델