

‘98 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

SMART용 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 설계  
Design of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive  
Mechanism for SMART

김지호, 허 형, 김종인

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

장기찬, 강도현

한국전기연구소  
경남 창원시 성주동 28-1

요 약

한국원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로 SMART는 핵반응열을 이용하여 기동하며, 무봉산 운전요건에 따라 제어봉구동장치만으로 노심제어가 가능해야 하므로 신뢰성은 물론 미세조정성능이 우수한 제어봉구동장치가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 설계요건을 만족할 수 있는 제어봉구동장치로서 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 설계특성과 핵심부품인 선형펄스모터의 크기 결정을 위한 전자기해석결과를 제시하였다.

Abstract

The integral reactor SMART currently under development at Korea Atomic Energy Research Institute is designed with soluble boron free operation and use of nuclear heating for reactor startup. These design features require the Control Element Drive Mechanism(CEDM) for SMART to have fine-step movement capability as well as high reliability for the fine reactivity control. In this paper, design characteristics of a new concept CEDM driven by Linear Pulse Motor which meets the SMART design requirements are introduced. The primary dimensions of the linear pulse motor are determined by the electro-magnetic analysis and the results are also presented.

1. 서론

제어봉구동장치(control element drive mechanism, 이하 CEDM)는 원자로가 정상운전 중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심의 핵반응도를 적절히 제어하며, 또한 원자로계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때, 제어봉을 신속하고 정확하게 노심 내부로 삽입시켜 핵분열을 정지시키는 장치이다. 한국원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로 SMART는 원자로 기동시 핵분열 반응열을 이용하여 냉각재를 가열하며, 무봉산 노심설계의 채택으로 CEDM만으로 반응도 제어가 가능해야 하므로 신뢰성은 물론 미세조정성능이 우수한 CEDM이 필요하다[1].

SMART의 이러한 설계요건에 적합한 CEDM으로서 선형펄스모터(linear pulse motor, LPM)형 구동장치를 개발중에 있다. 선형펄스모터형 CEDM의 주요 부품은 위치지시기(position indicator), 선형펄스모터, 잠금장치, 충격완화장치, 압력용기 등이며, 모터 고정자의 치구조물을 가동자를 따라 상하방향으로 선형적으로 배치함으로써 가동자의 최소 이동거리를 작게 설계할 수 있을 뿐만 아니라, 구동부위가 모두 전자기력만으로 지지되므로 기계적인 동력전달용 기구를 제거함으로써 구조가 매우 간단하고 신뢰성이 우수하다는 특징을 가지고 있다.

선형펄스모터형 CEDM은 현재 개념설계 단계로서 향후 핵심부품의 시제품을 제작하여 관련 성능시험을 수행하여 설계개념을 검증하고, 다음 단계에서는 기본설계를 수행하면서 원형을 제작하여 각종 성능시험을 수행할 계획이다. 본 논문에서는 현재까지 개념설계된 선형펄스모터형 CEDM의 각 부품들의 기능, 설계시 중점적으로 고려되어야 할 사항 및 구동 원리에 대하여 설명하고자 한다.

## 2. 설계특성

SMART에 장착될 선형펄스모터형 CEDM은 총 행정거리가 2,000mm로서 그림 1에서 보는 바와 같이 최대직경이 비교적 작으며 길고 홀쭉한 형태이다. 이 CEDM의 설계온도는 350°C, 설계압력은 17.0 MPa 이며 CEDM 압력경계 내부는 일차수로 채워지게 되므로 가동자는 일차수 내부에서 구동하게 된다. 고정자 권선의 보호를 위하여 내부 일차수의 온도는 180°C 이하가 되도록 설계된다. CEDM의 주요부품 및 기능은 다음과 같다.

### 2.1 위치지시기

그림 1에서 보는 바와 같이 선형펄스모터의 가동자와 연장봉의 연결부위 상단에는 원통형 영구자석이 설치되어 있는데 제어봉과 함께 움직이는 이 영구자석의 위치를 상부압력용기 외벽에 설치된 센서(초우크 ; choke)를 통해 감지함으로써 제어봉의 위치를 측정하게 된다. 이 초우크 집합체 내부는 permalloy 테이프를 적층하여 만든 토로이드형태의 코어를 알루미늄틀로 감싸 차폐하고 그 둘레를 코일로 감은 인덕터 형태이다. 영구자석의 길이는 초우크사이의 거리와 같으며 이웃 두 초우크가 한 쌍이 되어 위치를 측정하게 된다. 초우크와 초우크 사이의 위치는 선형펄스모터에 보낸 펄스(pulse)의 수로 측정할 수 있도록 하였다. 상단의 두 개 및 하단의 두 개 초우크는 각각 상·하부 한계스위치의 역할도 수행한다. 이 초우크센서는 독립한 제어 자화력을 주고 자기회로의 포화현상을 이용하여 교류 출력회로의 인덕턴스를 변화시켜 전압·전류특성을 조정할 수 있는 가포화리액터(saturable reactor)원리를 이용한 것으로 교류여자전류가 없는 경우, 코어가 대칭이고 재료는 균일하다면 리럭턴스는 같으므로 영구자석 축에 의하여 양분된 각각의 반원에는 단 방향의 기자력  $H_{ac}$ 가 발생하여 실제로 코어를 포화시킨다(그림 2 참조). 이 상태에서 교류여자전류를 공급하면 공급주파수에 따라 변화하는 교번기자력,  $H_{ac}$ 가 생성되고, 이것에 따라 각각의 반원에는 자속밀도의 변화가 아래 식과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} H_1 &= H_{ac} + H_{dc} \\ H_2 &= H_{ac} - H_{dc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{ac} + B_x \\ B_2 &= B_{ac} - B_x \end{aligned}$$

여기서,  $B_{ac}$ 는 교류공급시 변하는 코어 양쪽면에서 공통인 자속밀도이고,  $B_x$ 는  $H_{ac}$ 와  $H_{dc}$ 의 결합으로부터 합성된 자속밀도이다. 이  $B_x$ 에 대응하는 전압이 유도되고, 이 전압은  $B_x$ 의 변화율에 비례하기 때문에 입력교류전압 주파수의 2배로 변화되어 통상 제 2 고조파자속(2nd-harmonic flux)이라 불리는데, 이것에 의하여 제 2 고조파전압이 발생된다. 이 정보를 이용하여 위치를 측정하거나 위치지시기의 입력값으로 사용한다.

## 2.2 잠금장치

원자로의 안전정지기능을 향상시키기 위하여 솔레노이드, 한계스위치, 잠금링등으로 이루어진 잠금장치를 하부용기 상단에 설치한다. 이 장치는 원자로 정지시 제어봉구동장치 가동자의 상하운동을 제한하여 제어봉이 항상 완전삽입 위치에 있도록 구속한다.

잠금장치 압력용기 내부는 고정앵커, 이동앵커, 영구자석등으로 구성되고, 외부는 센서(초우크), 고정자 권선 등이 설치된다. 센서 및 고정자 권선이 있는 공간은 다시 얇은 스테인레스강으로 덮어 밀봉한다. 제어장치로부터 신호가 들어오면 전자석이 여자되어 이동앵커를 안쪽으로 밀어 넣으며 이 이동앵커축이 가동자의 인출을 막고 있던 링을 밀어 잠금을 풀어주게 된다. 잠금장치 이동앵커의 변위를 측정하기 위하여 이동앵커축에 2개의 영구자석을 설치하고 이의 움직임을 3개의 센서(한계스위치)에서 감지되도록 하였다. 전원이 끊어지면 여자력이 없어지면서 스프링의 힘으로 링이 원상 복원되어 가동축의 움직임을 구속한다. 잠금역활을 하는 링은 이동 샤프트가 하향으로 움직이는 것은 가능하지만 역으로는 움직일 수 없도록 설계되었다. 잠금장치 내부는 CEDM의 내부와 같은 압력 및 온도조건에 있게 되므로 설치시 구리로 된 가스켓으로 밀봉한다.

## 2.3 충격완화장치

비상사고시 외부전원이 차단되면, 선형펄스모터에서 발생하는 전자기력만으로 유지되고 있던 가동자, 연장봉 및 제어봉 그룹등 모든 구동부위가 자중으로 급속하게 낙하하면서 삽입된다. 이 때 떨어지는 충격에 의한 부품의 손상을 방지하기 위하여 그림 1에서와 같이 상부용기 하부에 충격완화장치를 설치해야 하는데 본 구동장치에서는 충격완화장치로서 수력댐퍼를 채택하였다. 이 수력댐퍼는 원통형으로서, 내부는 냉각재로 채워져 있는데 하중이 주어지면 내부의 유체가 댐퍼 원통상부의 작은 구멍으로 빠져나가면서 충격을 흡수하는 원리이다. 물이 빠져나가는 구멍의 크기는 댐퍼가 압축됨에 따라 작아지며 일정거리 이상 압축되면 구멍이 닫히게 되는 데 이 시점에서는 구동부분의 대부분의 운동에너지가 수력댐퍼에 흡수된 상태이므로 가동부위가 멈추더라도 충격을 훨씬 덜 받게 된다. 댐퍼용기가 상하로 움직일 때의 마찰을 줄이기 위하여 압력용기 및 수력댐퍼용기 사이에 Graphite-fluoroplast 재질의 마찰베어링을 설치하였다.

## 2.4 압력용기

선형펄스모터형 CEDM 압력용기는 샤프트의 이동안내를 하는 상부용기, 구동부위 및 펄스모터가 들어있는 하부용기등 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 이 두 용기는 스테드 볼트, 너트로 연결되며, 단면이 사각인 구리로 된 가스켓에 의해서 밀봉된다. 하부용기의 각 권선블럭 사이에는 자장의 흐름을 원활히 하기 위하여 비자성체로 용접한다.

## 3. 선형펄스모터의 전자기 해석

선형펄스모터는 원통형의 4상 직류 동기성 모터를 사용하며 별도의 밀봉이 필요없는 캔드 모터(Canned Motor) 형을 사용한다. 그림 3은 선형펄스모터의 개념을 보여주는 종단면도이며 그림 4는 횡단면도이다. 이 두 그림에서 보는 바와 같이 선형펄스모터는 연장봉과 연결되어 상하운동을 하는 가동자 및 내,외부 고정자 치, 그리고 압력용기 바깥쪽에 상하 구동방향으로 선형적으로 배치된 4개의 고정자 권선블럭으로 이루어져 있다. 가동자, 연장봉 및 제어봉그룹을 포함한 모든 구동부분이 선형펄스모터의 전자기력만으로 지지되고 있으며 고정자를 내부고정자와 외부고정자로 분리하여 그 사이로 가동자가 상하운동을 하도록 하였다. 가동자와 고정자가 직접 접촉하는 것을 방지하기 위하여 각 외부고정자 치구조물 사이, 그리고 내부고정자 사이에 마찰베어링을 설치하였으며, 가동자는 이 마찰베어링에서만 접촉하게 된다. 이 마찰베어링 재질은 고온에서도 내마모성이 우수하고 마찰계수가 적은 Graphite-fluoroplast를 사용함으로써 마찰에 의한 저항을 최소화할 수 있도록 하였다.

선형펄스모터는 4개의 상권선중 두개의 상권선에 여자(2상 여자)함으로써 가동자를 상하로 구동하게 되는데, 그림 3에 표시된 것처럼 각 상권선을 위에서부터 차례로 1, 2, 3, 4 라고 할 경우, 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 의 순서로 여자하면 제어봉이 삽입되고, 4-3, 3-2, 2-1, 1-4 의 순서로 여자하면 제어봉이 인출된다. 제어봉의 삽입 및 인출속도는 제어장치에서 선형펄스모터로 보낸 펄스의 수에 의해 결정된다. 가동자 및 고정자의 치 피치를  $p$ 라 하면 가동자 치가 고정자 치와 상이 바뀔 때마다  $p/4$  만큼 어긋나도록 설계함으로써(그림 3 참조) 가동자는 4회의 펄스마다 한 피치만큼 이동하게 되며, 따라서 한 펄스당 가동자의 이동거리(제어봉 이동거리)는  $p/4$  가 된다. 따라서 가동자 및 고정자의 치 피치를 조절함으로써 한 펄스당 이동거리를 조정할 수 있다. 각 상권선에서의 권선의 배치는 여러 가지 방법이 있을 수 있는데 그림 4 와 같이  $90^\circ$  간격으로 배치된 4개의 권선으로 이루어져 있는 경우, 자력선 방향은 그림 4 에 표시된 것과 같으며 이처럼 자로를 형성하기 위하여 압력용기, 외부고정자 치구조물, 가동자의 일정부위를 비자성체로 용접하여 제작한다. 권선의 적절한 냉각을 위하여 권선블럭은 압력용기의 외부에 설치되도록 하여 일차수가 직접 접촉되지 않도록 하였으며, 권선블럭이 설치된 공간은 외부공기와 닿지 않도록 얇은 스테인리스 강으로 된 용기로 덮는다.

선형펄스모터의 힘 발생원리에 대하여 간략히 설명하기 위하여 투자율이 무한대인 철심을 가정하여 고려하면, 자기회로에 저장되는 자기에너지는  $W_m$  과 자기수반에너지  $W_c$ 는 다음 식과 같이 된다[2].

$$W_m = \int \int^B H(B) dB dV \quad (1)$$

$$W_c = \int_V \int_0^H H(B) dB dV \quad (2)$$

전류가 일정할 때 발생하는 추력  $F_x(\Theta_\delta, x)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$F_x(\Theta_\delta, x) = \left[ \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \right]_{\Theta_\delta = const} \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ 는 pole pitch,  $\delta$ 는 공극, B는 공극자속밀도,  $\Theta_\delta$ 는 기자력을 나타낸다. 자기 수반에너지  $W_{co}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$W_\infty = \frac{B^2}{2\mu_0} \delta x l \quad (4)$$

여기서,  $l$ 은 z방향 길이를 나타낸다. 이 때 자속밀도 B는 다음과 같다.

$$B = \mu_0 \frac{\Theta_\delta}{\delta} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 자기수반에너지  $W_{co}$ 는 다음과 같다.

$$W_{co}(\Theta_\delta, x) = \frac{\mu_0 \Theta_\delta^2}{2\delta} x l \quad (6)$$

식(3)에서 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F_x(\Theta_\delta, x) = \frac{\mu_0}{2\delta} \Theta_\delta^2 l \quad (7)$$

$$F_{x_{mi}} = \frac{1}{2} F_x = \frac{\mu_0}{4\delta} \Theta_\delta^2 l \quad (8)$$

따라서, 단위면적당 발생하는 힘 밀도  $F_{AX}$ 는 다음 식과 같다.

$$F_{AX} = \frac{F_{x_{mi}}}{2\tau l} = \frac{\mu_0}{8\delta\tau} \Theta_\delta^2 \quad (9)$$

이상의 식은 선형펄스모터에서 발생하는 힘 밀도로 모터설계시 기본식으로 이용하고 있다. 또한, 그림 5는 추력을 계산하기 위하여 우선 2차원으로 등가화한 모델의 설계변수를 나타내며, 그림 6은 고정자치와 가동자치가 완전히 일치하였을 때의 등자속선분포를 나타낸다. 그림 7은 치폭 a에 대한 슬롯폭 b의 비가 변할 때 발생하는 추력밀도를 보여주며, 그림 8은 고정자치 높이에 대한 추력밀도 변화추이 곡선이다. 이 곡선들로부터 필요한 추력에 대한 모터의 주요 치수를 결정할 수 있으며, 이 치수들은 선형스텝모터의 전체적 크기를 산정하는데 활용될 수 있다. 그림 9는 이러한 해석을 통하여 계산된 치수를 바탕으로 IDEAS Code로 작성된 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 3차원 모델을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

SMART에 장착될 선형펄스모터형 CEDM의 설계개념을 살펴보았으며 핵심부품인 선형펄스모터의 전자기해석을 수행하여 모터의 크기와 추력과의 상관관계를 구함으로써 모터의 구조 설계에 직접 반영할 수 있게 되었다. 선형펄스모터형 CEDM은 모터 고정자의 치구조물을 가동자를 따라 상하로 선형적으로 배치함으로써 가동자의 최소 이동거리를 작게 설계할 수 있으므로 미세조정성능 및 높은 신뢰성이 요구되는 SMART용 CEDM으로 적합하다. 현재는 개념설계 단계로서 주요 부품의 개념이 거의 완성된 단계이며 이 결과를 바탕으로 위치지시기, 선형펄스모터, 잠금장치등 핵심부품에 대한 시제품 제작을 추진중에 있다. 이 시제품이 완성되면 성능시험을 수행하여 설계개념의 타당성을 검증하고 설계에 반영할

계획이다. 또한 다음 단계에서는 기본설계를 수행하면서 전체 원형을 제작하여 각종 성능시험을 수행할 계획이다.

## 5. 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 박근배외, “중소형 일체형원자로 기계구조설계개발”, KAERI/RR-1711/96, 1997.
- [2] 장기찬, 하경덕, 강도원, 허형, 김지호, 김종인, “한국형 원자로의 제어봉 구동용 선형 전동기 설계에 관한 연구”, 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.

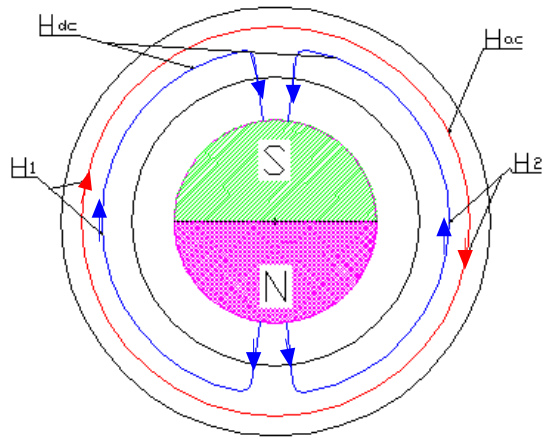
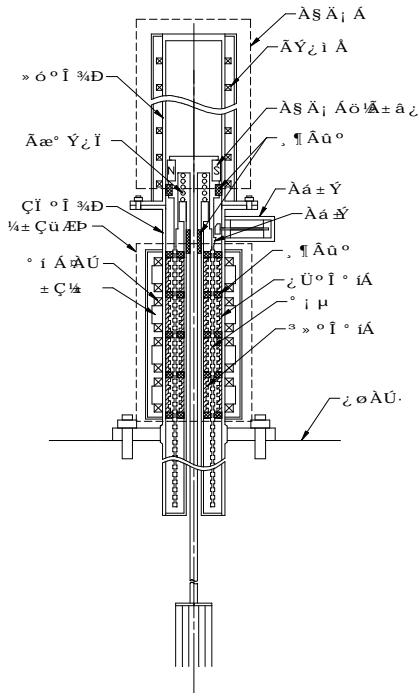


그림 1. 선형펄스모터형 제어봉구동장치 개념도

그림 2. 초우크 코어내의 기자력 분포

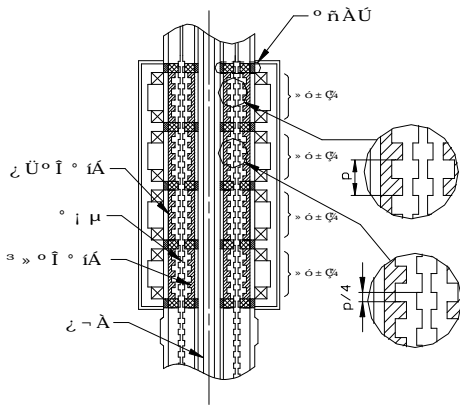


그림 3. 선형펄스모터의 종단면도

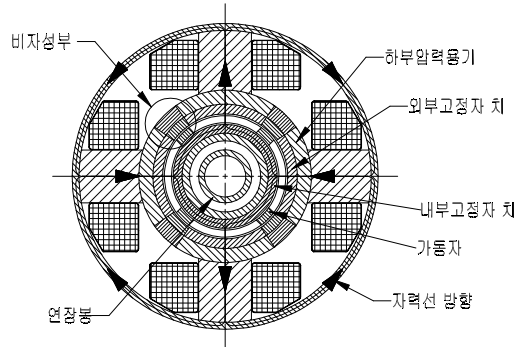


그림 4. 선형펄스모터의 횡단면도

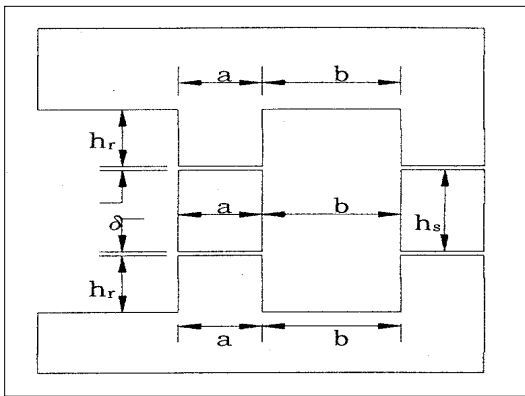


그림 5. 2차원 등가회 모델 변수

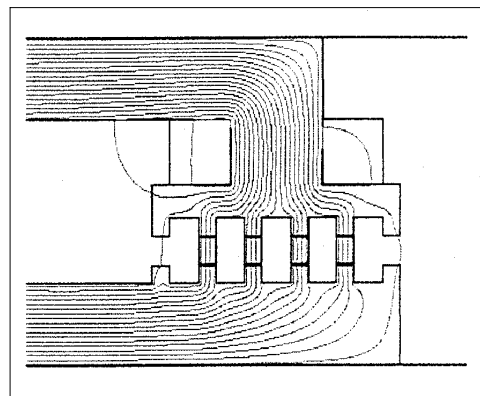


그림 6. 등자속선 분포

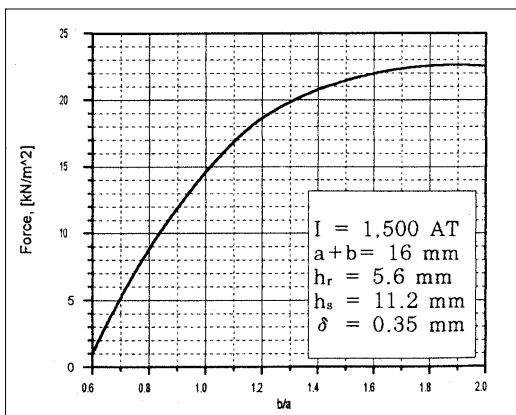


그림 7. 치폭과 슬롯에 대한 추력밀도 곡선

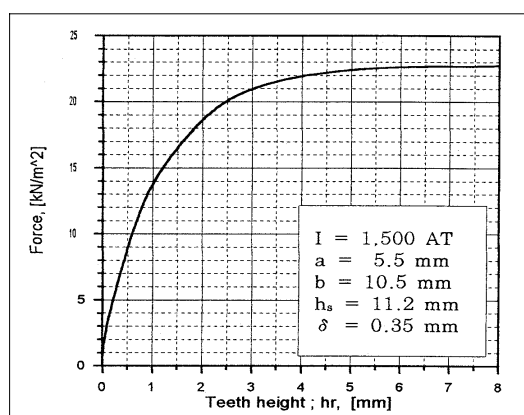
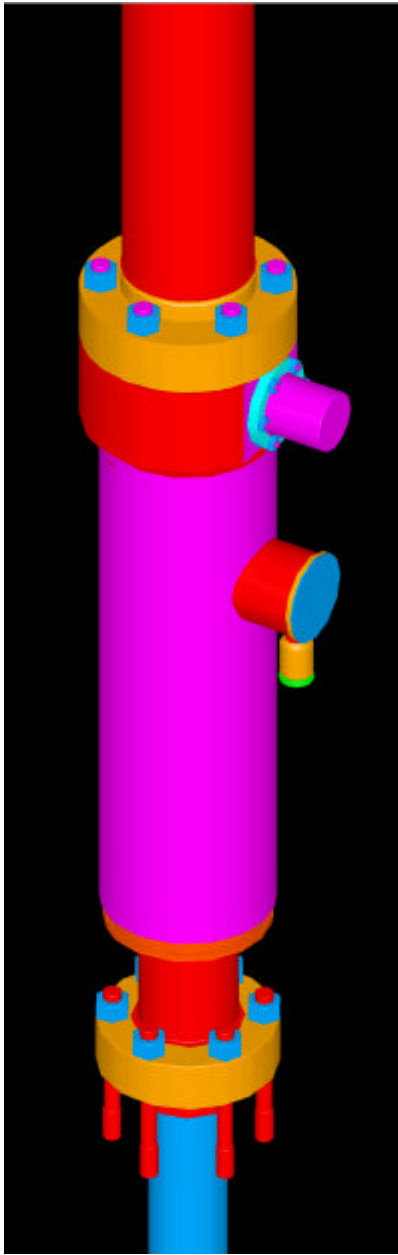
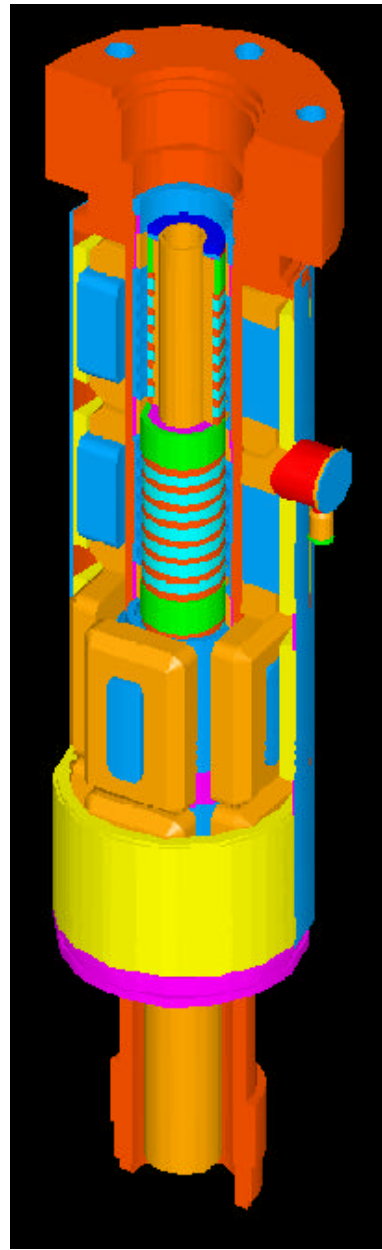


그림 8. 고정자 치 높이에 대한 추력밀도 곡선



(a) 전체 조립도



(b) 선형펄스모터

그림 9. 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 3차원 모델