

SMART용 제어봉구동장치에 장착되는 잠금장치의 전자기 해석
Electromagnetic Analysis of Locking Device for SMART Control Element Drive
Mechanism

허 형, 김종인, 김지호, 김용완, 박진석
한국원자력연구소

요 약

일체형원자로 SMART의 선형펄스모터형 제어봉구동장치에 장착되는 제어봉의 무단인출 방지장치(잠금장치)를 개념설계하고, 관련한 전자기해석을 수행하였다. 잠금장치의 전자기해석을 위한 플런저모델을 개발하고, 이에 대한 기본적인 이론을 정립하였다. 잠금장치의 플런저에 추력이 발생하는 설계변수를 도출하고, 추력발생경향을 유한요소법으로 해석하여 설계 최적치를 계산하였다.

Abstract

A numerical electromagnetic analysis was performed for the control rod locking device which is installed in the control element drive mechanism of integral reactor, SMART. A plunger model for the electromagnetic analysis of the locking device was developed and theoretical bases for the model were established. Design parameters related to plunger pushing force were identified, and the optimum design point was determined by analyzing the trend of the plunger pushing force with finite element method.

1. 서론

일체형원자로 SMART는 기동시 핵반응 열을 이용하고, 무봉산 노심설계의 채택으로 반응도 제어가 제어봉구동장치만으로 수행되어야 하므로 미세조정이 가능한 선형펄스모터형으로 개발되고 있다.[1]

SMART 제어봉구동치에는 원자로가 안전정지 상태에 있을 때(제어봉이 완전 삽입되어 있을 때) 외부 충격 등과 같은 주변 여건에 의하여 제어봉이 임의로 빠질 수 있는 사고를 방지하기 위하여 잠금장치를 제어봉구동장치 압력용기 외벽 쪽에 수평방향으로 설치한다. 이 잠금장치는 신뢰성을 높이기 위하여 원자로의 처음 기동 시에만 전원을 공급하여 작동을 하고 제어봉 삽입 시에는 제어봉구동장치 가동자의 하강이 잠금장치에 의해 전혀 영향을 받지 않도록 설계되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 기능상 요구조건과 공간제한 문제에 적합한 잠금장치를 설계하고 관련한 전자기 해석을 수행하였다. 잠금장치에 추력을 발생하는 설계변수를 도출하고, 추력발생경향을 유한요소법으로 해석하여 설계 최적치를 계산하였다.

2. 잠금장치(Locking Device)의 설계

잠금장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 영구자석, 위치감지용 초크센서, 전자석, 잠금링 등으로 구성되어 있다. 원자로 안전정지중, 혹은 운전 중에는 복원스프링이 이동축을 바깥쪽으로 밀어서 잠금링이 잠김 위치에 유지되도록 하며, 원자로 기동시 제어봉과 연결되어 있는 가동자 상부구조물이 위쪽으로 인출되기 시작하면 전자석을 여자하여 고정앵커가 이동축과 연결된 이동앵커를 당

겨주고 또 이 이동축이 잠금링을 밀어 잠금 해제 위치로 이동시키게 된다. 가동자 상부구조물에 만들어진 잠금턱이 잠금링의 위쪽으로 이동하고 나면 전자석에의 여자를 중단하여 복원스프링의 힘으로 잠금링은 다시 잠금상태를 유지하게 된다. 원자로 정지신호에 의해서 제어봉이 완전삽입위치로 가는 경우(가동축 하강)는 잠금링의 윗 부분에 경사면이 있으므로 잠금링이 잠김위치에 있다 하더라도 잠금턱이 잠금링을 자유롭게 통과할 수 있다. 이동앵커의 이동이 유체저항에 의해 방해 받지 않도록 이동앵커에 구멍을 만들어 유로를 형성해 주었다.

잠금장치의 정상 작동 여부를 확인하기 위하여 이동축 한쪽 끝단에는 두 개의 영구자석을 설치하고 이 영구자석의 움직임을 압력용기 외벽에 설치된 위치감지용 초크센서에서 감지하여 잠금링이 잠김상태에 있는지 혹은 잠금해제 상태에 있는지를 확인할 수 있도록 하였다. 위치감지용 초크센서는 압력용기 외벽에 일정간격으로 3개가 설치되며, 영구자석의 축방향 길이를 초크사이의 거리에 고정앵커와 이동앵커사이의 공극을 더한 것과 같도록 설계하여 잠금링이 잠김위치에 있는 경우는 바깥쪽 두 개의 초크(2번 및 3번)에 영구자석의 자력선이 영향을 미치게 되고, 전자석이 여자 되어 이동앵커가 고정앵커에 붙는 경우(잠금 해제)는 처음 두 개(1번 및 2번)의 초크에 영구자석의 자력선이 영향을 미치도록 설계하였다. 따라서 초크는 쌍으로 영구자석의 위치를 감지하게 되는데 전자석에 가까운 쪽부터 처음 두 개(1번 및 2번)의 초크는 전자석 전원공급확인 한계스위치로서 잠금 해제를 확인하는 스위치이며, 바깥쪽 두 개(2번 및 3번) 초크는 전자석 전원차단 확인 한계스위치 즉, 잠금을 확인하는 스위치의 역할을 한다. 초크는 Permalloy로 된 원환형 코어를 알루미늄으로 케이싱한 형태로 그 위를 90° 간격으로 연자기철(Magnetosoft Steel)로 된 4개의 자로제공용 소켓(Shoes)과 이들 사이에 권선을 설치하여 위치감지용 영구자석 이동에 따른 자력선의 변화를 충분히 감지하도록 설계하였다. 솔레노이드 이동축이 움직이고 연결된 영구자석이 초크로 접근할 때 영구자석의 자력선은 초크의 쇠코어를 변화 시키며 그 결과로서 권선에 흐르는 전류가 변화된다. 초크는 비자성강으로 된 압력용기 외벽면에 설치되므로 미약한 자속에도 투자율이 매우 높아지는 78.5% Ni합금인 Permalloy 로 만든 코어를 사용하여 압력용기 벽면에 수직인 방향의 자력선을 충분히 감지할 수 있도록 하였다.[7]

3. 전자기 해석

이상의 기능상 요구조건과 공간제한문제를 해결할 수 있는 플런저해석 모델을 개발하였다. 플런저는 솔레노이드 전자석 코일 안에 넣은 철판이 코일에 전류를 흐르게 하면 흡인되는 작용을 이용한 구조로 잠금장치의 압력용기와 고정앵커를 솔레노이드 전자석으로, 이동앵커를 이동철판으로 상상시켜 개발한 것이 플런저해석 모델이다. 이 모델을 이용하여 솔레노이드 전자석의 추력을 계산하면 다음과 같다. [2, 3]

전자석의 자속밀도를 B 로 하고 공극공간에서 자속확산이 없다고 가정하면, 공극 내부나 전자석, 고정앵커, 이동앵커내부도 자속밀도는 일정하므로 B 이다.

즉, 정상자계에 저축되는 전체에너지 W_H 는

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} B \cdot H dv \quad (1)$$

로 표시된다. $B = \mu H$ 인 관계에서 식(1)은

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \mu H^2 dv \quad (2)$$

또는

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \frac{B^2}{\mu} dv \quad (3)$$

와 같다.

이 때 식(3)에서 자계에너지의 증가량 dW_H 는

$$dW_H = FdL = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} SdL \quad (4)$$

이며, S 는 철심의 단면적이다. 따라서

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (5)$$

이다.

여기서, 이 때 코일의 단위길이 당(1 m당) 권선수를 N , 코일의 전류를 I 라고 하면, 철심내의 자계의 세기는 $NI \cdot A \cdot T/m$ 이므로 철심의 자화곡선에서 자속밀도를 구할 수 있다. [4,6,8,9] 이상의 식(5)는 플런저형 잠금장치에서 발생하는 흡인력으로 설계추력이 결정되면 이 식에 의하여 철심단면적이 결정되고, 이에 따라 요구되는 공극의 자속밀도도 결정할 수 있다.

Fig. 2는 작성된 플런저형 잠금장치 모델로 기본 설계사양은 표 1과 같다. 최대 추력을 얻기 위하여 각 설계변수의 추력발생 경향을 유한요소법으로 해석하여 설계최적치를 계산하였다.[5] 3차원 공간문제에 있어 1개의 축방향에 대해 어떤 물리적 상태가 무한히 동일 상태로 유지되는 경우에는 이를 2차원 문제로 흔히 다루고 있기 때문에 Fig. 2의 잠금장치에 대한 추력 계산은 3차원 형태를 2차원 형태로 등가변환한 플런저모델을 개발하여 해석하였다. 이 최대칭구조는 전자계 해석시 Fig. 3과 같이 2차원 플런저 등가모델의 반쪽만으로도 해석가능하다.

Fig. 3에서 설계변수 a 는 코일의 길이로서 a 가 감소하면 전자석 철심관점에서는 제한된 공간에서 두께가 증가됨을 나타낸다. 설계변수 b 는 코일의 반경방향 폭으로서 b 가 감소하면 전자석 철심의 축방향 두께는 증가한다. c 는 전자석의 비자성부(groove)의 폭, d 는 이동앵커의 반경, e 는 고정앵커와 이동앵커간의 이격거리(공극), f 는 이동앵커와 전자석 철심간의 공극을 나타낸다.

Fig. 4는 2차원 등가모델에서 고정앵커와 이동앵커가 최대로 이격된 상태에서의 상용 전자계해석틀을 이용하여 계산한 등자속분포를 나타낸 것이다. 이 때 최대 이격거리는 3 mm로 계산하였다. 이 최대이격거리에서 설계추력을 만족시켜야 한다.

Fig. 5는 이동앵커와 전자석사이의 축공극(f)으로 0.5 mm와 1.0 mm 일 때 전류밀도에 따른 추력을 계산한 것이다. 이 것은 제작시 가공오차에 따른 추력변화의 경향을 해석한 결과로서 설계추력이상으로 발생시키려면 축공극 f 는 0.5 mm이하로 제작되어야 함을 보여준다.

Fig. 6은 결정된 범위내에서 전자석 철심의 포화를 고려하면서 전자석 코일 단면적의 치수인 a 와 b 를 전자석의 좌측 상단 모서리부의 두께가 증가하도록 각각 1mm 씩 줄일 때 추력의 변화를 보여준다. 해석결과 철심의 단위 면적당 자속밀도가 높아서 포화가 될 경우 누설자속으로 효율이 저하되기 때문에 좁게 설계된 철심지역을 넓힘으로써 추력을 상당히 높힐 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 비자성체 용접부(groove)형태에 따른 추력의 정도를 보여준다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 압력용기를 자로제공용 철심으로 사용해야 하기 때문에 원하는 방향으로 추력을 발생시키면서 압력용기 역할을 하기 위해서는 비자성체 용접부가 필요하다. 실제 제작 시 사용되는 5가지 용접 groove 형태중 발생추력은 긴 직사각형 형태의 groove가 가장 높은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 위에서 언급한 설계변수의 최적치를 조합하여 각 전류밀도별 계산된 추력이다. 잠금장치는 평상시(잠김상태)에는 전원이 차단되어 있다가 원자로 기동시에만 전원이 공급되므로 코일의 열발생은 크게 문제가 되지 않으므로 일반 전동기등의 전류밀도보다 수 배정도 높아도 가능할 것으로 판단된다. 이상과 같은 계산결과로부터 표 1의 사양과 제작상 제약조건 및 조립조건을 고려하여 Fig. 1의 SMART CEDM의 잠금장치의 세부 최적설계치를 결정한 결과를 표 2에 나타내었고, 이 때 최대추력은 103 [N]이다.

4. 결론

SMART CEDM에 설치될 제어봉 무단인출 방지용 잠금장치의 설계와 관련하여 전자기적 해석을 하였다. 이 해석을 위하여 잠금장치의 3차원형상을 2차원 플린저모델로 등가화시켜 기능상 요구조건과 공간제약 조건내에서 이용가능한 각 설계변수들에 대하여 추력발생특성을 해석하였다. 해석결과 최대추력 발생조건은 전류밀도증가가 우선이었으나 자속밀도 포화시에는 자로면적을 증가시켜야 하는 한계가 있었으며, 비자성체 groove의 형태에 따른 추력변화도 현저하였다. 연구결과로 얻어진 설계곡선들은 추후 설계변수 크기와 형상 변화에 도움이 되리라 생각된다.

이상과 같은 연구를 통하여 얻어진 최적 설계치의 조합을 이용하여 계산한 결과 103[N]으로 요구추력을 만족시키지만 추후 이론 최적설계치와 시작품의 실험치와의 비교검증시험이 진행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박근배 외 11인, 중소형 일체형원자로 개발 - 중소형 일체형원자로 기계구조설계개발”, KAERI/RR-1711/96
- [2] William H. Hayt, Engineering Electromagnetics, 4th edition, McGraw-hill, 1981
- [3] Peter F. Ryff, Electric Machinery, 2nd edition, Prentice Hall Career and Technology, 1994
- [4] 성낙진, 액튜에이터-메커트로닉스 시리즈(2), 대림출판사, 1988
- [5] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1987
- [6] Colomel Wm.T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, 2nd edition, 1988
- [7] R. Boll, K.J. Overshott, Sensors- A Comprehensive Survey:Magnetic Sensors, VCH, 1989
- [8] James T. Humphries, Leslie P. Sheets, Industrial Electronics, 4th edition, Delmar, 1993
- [9] Milton Kaufman, Arthur H. Seidman, Handbook for Electronics Engineering, 2nd edition, 1984

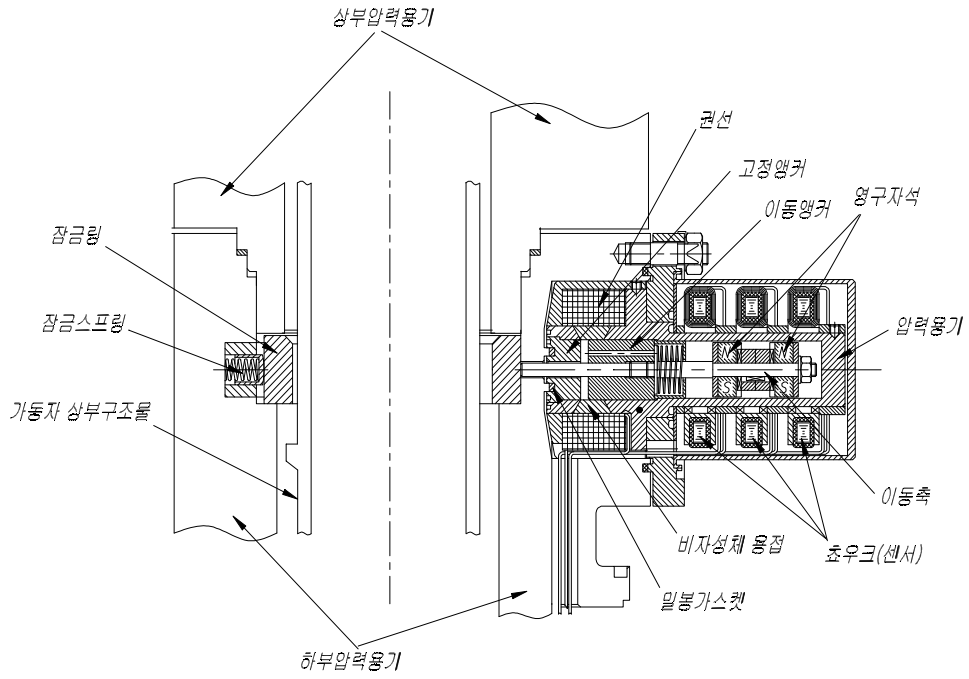


Fig. 1 잠금장치 단면도

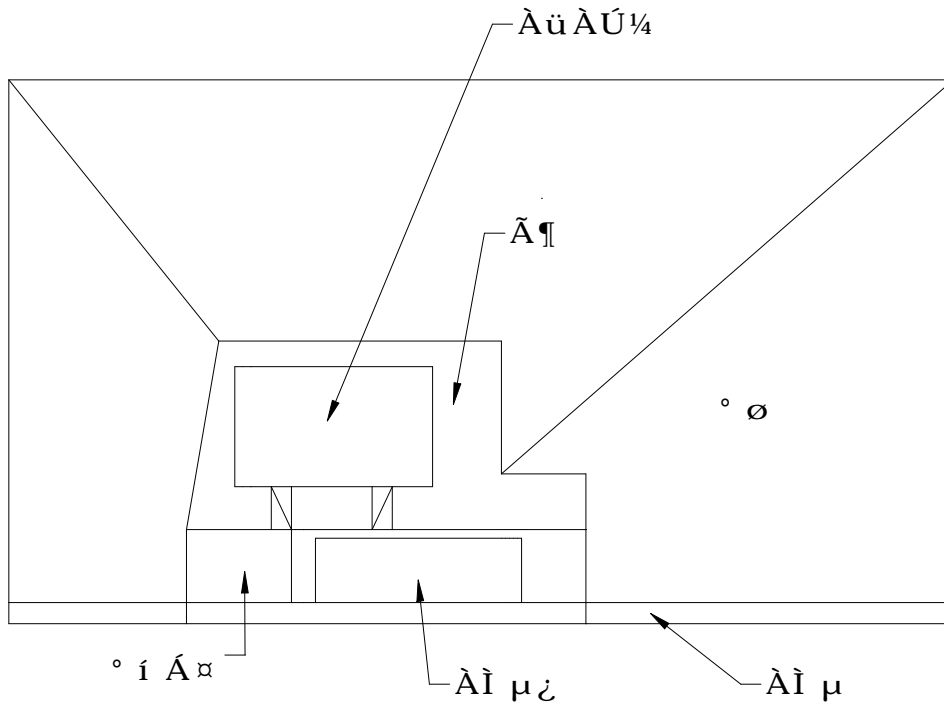


Fig. 2 플런저 해석 모델

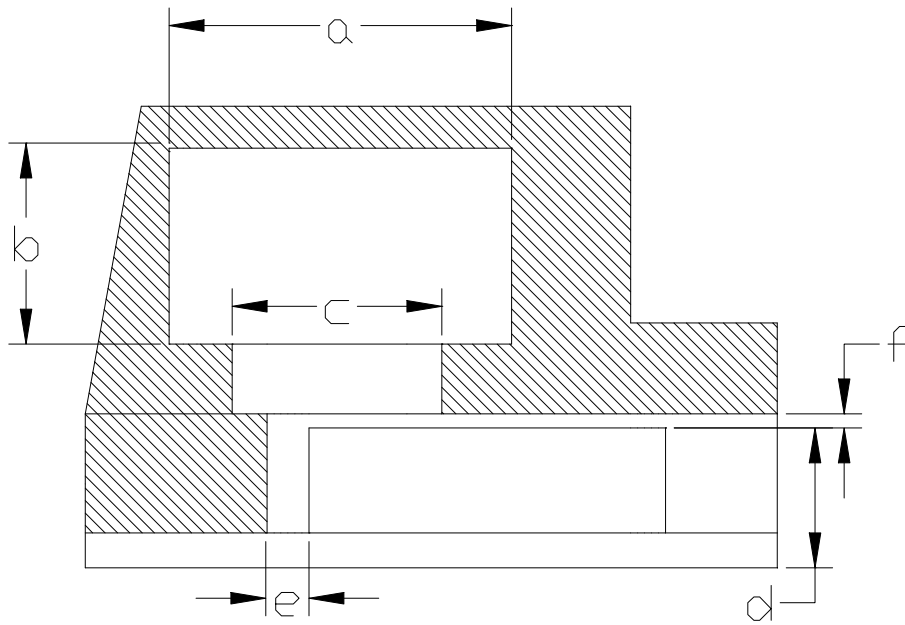


Fig. 3 2차원 등가모델 변수

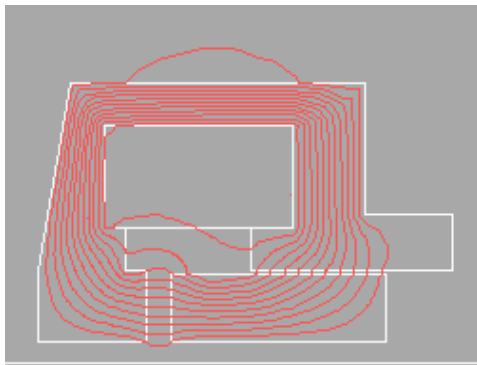


Fig. 4 등자속선 분포

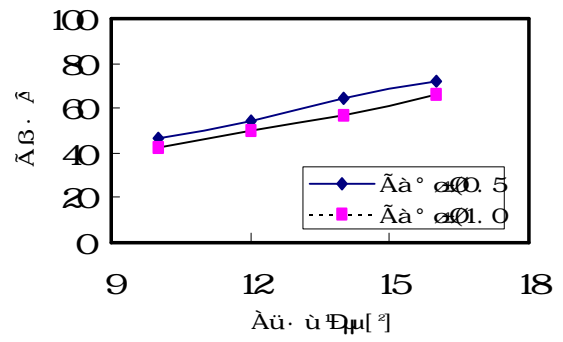


Fig. 5 축공극과 전류밀도에 따른 추력곡선

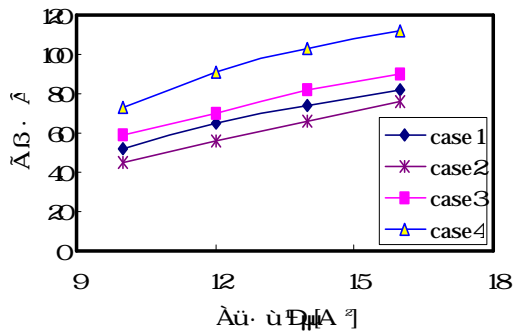


Fig. 6 고정설계범위내 전자석 면적
변화에 따른 추력곡선

- 1)case1 : b를 1mm 감소
- 2)case2 : a를 1mm 감소
- 3)case3 : a와 b를 1mm 씩 감소
- 4)case4 : a와 b를 2mm 씩 감소

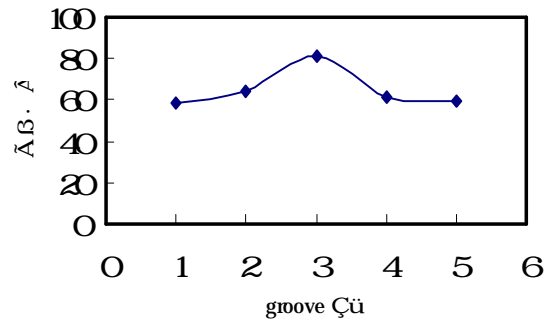


Fig. 7 groove 형태에 따른 추력곡선

- 1)small rectangular 2) wide-v
- 3)large rectangular
- 4)left single-v 5)right single-v

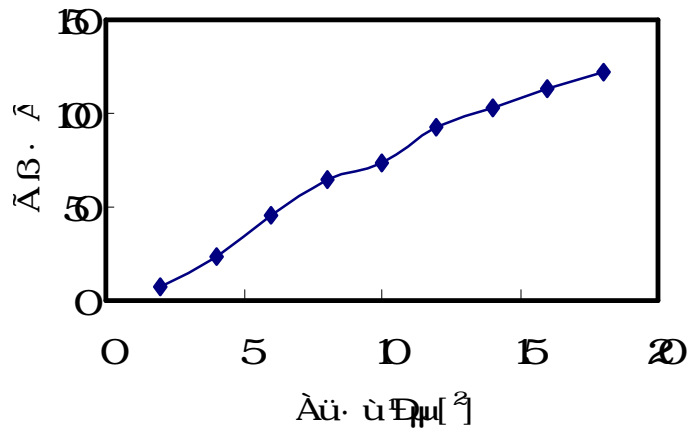


Fig. 8 선택된 최적 설계치에서
전류밀도별 추력곡선

표 1. 잠금장치 설계사양

번호	항 목	값
1	이동앵커구동거리[mm]	3.0
2	가동부 총중량[Kg]	10
3	요구 추력[N]	98 이상
4	축공극[mm]	1.0 이하

표 2. 2차원 등가 모델 설계변수 및 최적 설계치

기호	항 목	최적설계치	비 고
a	전자석 축방향 두께변화[mm]	2mm 감소시	FEM결과 철심의 면적당 자속밀도 포화로 자로면적을 증가시킴
b	전자석 반경방향 두께변화[mm]	2mm 감소시	
c	groove형태변화	큰직사각형형태	기존형태의 vee 형에서 large rectangular 형태가 우수함
e	고정/이동앵커간 공극[mm]	3.0 이하	공극길이가 짧을수록 유리하지만 가공능력을 고려해야 함
f	축공극길이변화[mm]	0.5 이하	