

Study on Magnetic Property for Test Coil and Permanent Magnet

Yun Bum Park, Jong Wook Kim, and Jae Seon Lee*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

(Received 23 September 2016, Received in final form 20 October 2016, Accepted 20 October 2016)

A CRDM (Control Rod Drive Mechanism) is an electromagnetic device which drives a control rod assembly linearly to regulate the reactivity of a nuclear core. An RPIS (Rod Position Indication System) is used as a position indicator for a control rod assembly of a CRDM of SMART, and an RPIS consists of permanent magnets and reed switches. SMART is designed for the maximum coolant temperature of 350 °C, and the permanent magnets are installed inside of the reactor. The reed switches and electrical circuit are installed outside of the reactor on the other hand. Test coil for a reed switch is test equipment for quality verification of a reed switch, and a test coil consists of a coil and core. In this study, magnetic property of test coil and permanent magnet on a reed switch is compared by using finite element electromagnetic simulation.

Keywords : rod position indication system, test coil, permanent magnet, magnetic property, reed switch

Test Coil과 영구자석의 자기 특성 연구

박윤범 · 김종욱 · 이재선*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111, 34057

(2016년 9월 23일 받음, 2016년 10월 20일 최종수정본 받음, 2016년 10월 20일 게재확정)

원자력발전소의 원자로에는 노심 반응 속도를 제어하기 위하여 제어봉구동장치가 사용된다. 한국원자력연구원의 SMART 원자로의 원자로 가동 중 제어봉집합체의 위치를 확인하기 위하여 제어봉구동장치에 영구자석과 리드스위치로 구성되는 위치지시기가 설치된다. 원자로 가동 온도는 최대 350 °C로 고려되어 설계되며, 영구자석은 원자로 내에 설치된다. 반면에 리드스위치와 전기회로는 원자로 외부에 설치된다. Test coil은 리드스위치의 품질 검증을 위한 장비로서, 코일과 철심으로 구성되어 있다. 본 연구는 리드스위치에 미치는 Test coil과 영구자석의 자기 특성을 비교하고자 수행되었으며, 유한요소 전자기 시뮬레이션을 활용하였다.

주제어 : 위치지시기, Test coil, 영구자석, 자기 특성, 리드스위치

I. 서 론

원자력발전소의 원자로에는 노심 반응 속도를 제어하기 위한 목적으로 전자기 장치인 제어봉구동장치가 사용된다[1]. 한국원자력연구원에서 개발한 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로에는 가동 중 원자로 내부의 제어봉집합체 위치를 확인하기 위하여 제어봉구동장치에 위치지시기가 부착되며, 위치지시기는 영구자석과 리드스위치로 구성되어 있다. 원자로가 가동 중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심 반응을 제어하기 위해서는 위치지시기 구성품의

온도 변화에 따른 자기 특성을 고려한 설계가 필수적이다[2]. 원자로 가동 온도는 최대 350 °C로 고려되어 설계되며, 영구자석 자기장에 의해 리드스위치가 of/off 됨을 이용한 전기회로로부터 제어봉집합체의 위치를 확인할 수 있다. 특히 소형 원자로인 SMART는 보다 정밀하고 정확한 제어봉구동장치의 제어가 요구된다[3]. Test coil은 위치지시기의 리드스위치에 대하여 품질 검증을 위한 장비로서 코일과 철심으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 리드스위치 제작 업체로부터 제공받은 Test coil의 암페어 턴 값과 영구자석의 자기 특성을 비교하였으며, 상용전자기 해석 프로그램인 MAXWELL[4]을 활용하였다. 우선 Test coil의 인가전류에 따른 리드스위치의 인력을 계산하고, 다음으로 영구자석의 온도에 따른 리드스위치의 인력을 계산하였다. 해석 절차는 각각의 유한요소모델을

구성하고, Test coil에 인가전류 및 온도에 따른 영구자석 물성치를 입력하여, 리드스위치에 미치는 인력을 계산하였다. 본 연구에서 분석된 결과는 SMART 제어봉구동장치 위치지시기 설계에 반영되어 제어 정밀도를 향상시킬 예정이다.

II. 영구자석 및 리드스위치

1. 영구자석

위치지시기는 제어봉집합체를 상하로 구동시키는 구동축 상부에 설치된 영구자석에서 발생하는 자기장에 반응하여 리드스위치가 on/off되고, 이를 전압분배회로를 통해 제어봉집합체의 노심 내 위치로 환산하게 된다[2]. 영구자석으로는 니켈, 철, 알루미늄, 코발트 등의 합금으로 구성된 Alnico 계열이 적용되는데, Alnico는 기계적 강도가 강하고 온도계수가 낮아 고온에서 감자가 거의 발생되지 않는 자성체이므로 350 °C에서 동작하여야 하는 원자로에 적합한 재료이다. 제어봉구동장치의 위치지시기는 리드스위치 설치 간격과 배열 형상에 따라 정밀도가 결정되기 때문에 자기장을 발생시키는 영구자석의 등급 선정 또한 매우 중요하다. 한 예로 Alnico500[5]의 온도에 따른 BH곡선을 Fig. 1에 나타내었다. -180 °C, -50 °C,

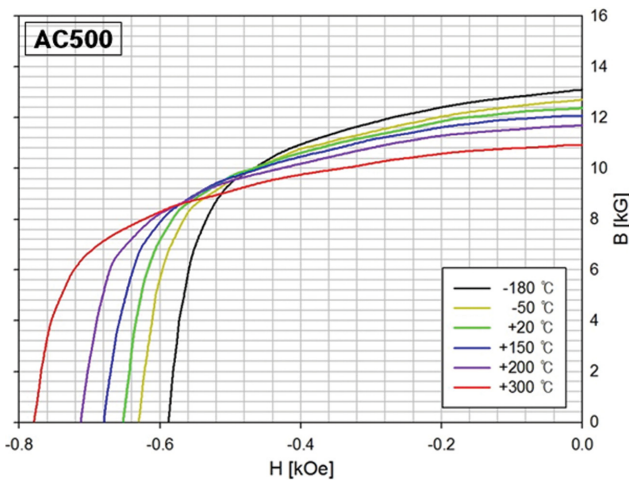


Fig. 1. (Color online) BH curve of Alnico500 magnet.

상온 20 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C에서의 자기 특성을 나타내었으며, 가로축은 자계의 세기 H, 세로축은 자속밀도 B를 의미한다.

Table I에는 영구자석 Alnico의 등급에 따른 자기 특성들을 나타내었다. 전자기 해석에서는 Table I의 잔류자속밀도 (Residual Induction, B_r) 값과 보자성(Coercivity, H_c) 값이 사용되었다. 하지만 온도에 따른 자속밀도계수 및 보자성계수는 20~150 °C의 범위 내에서만 -0.02%/°C이므로, 그 외 온도에서의 자속밀도는 Fig. 1의 값을 사용하였다.

2. 리드스위치

리드스위치는 영구자석에서 발생하는 자기장에 의해 자성체인 blade 간의 인력과 복원력으로 접점이 on/off되는 구조이다. 리드스위치는 reed blade 한 쌍, switch contact인 접점, 비활성기체로 채워진 Glass body로 구성되어 있다. 접점은 잦은 contact에 의한 마모를 막기 위해 백금의 한 종류인 이리듐으로 코팅되어 있다.

Fig. 2은 영구자석에서 발생하는 자기장과 리드스위치 접점이 on이 되는 형상을 표현하였다. 영구자석의 온도에 따른 자기장 세기와 리드스위치와의 거리에 따라 on/off 되는 설계가 상당히 중요하기에, 전자기 해석을 수행하여 위치지시기 설계에 활용하고자 한다.

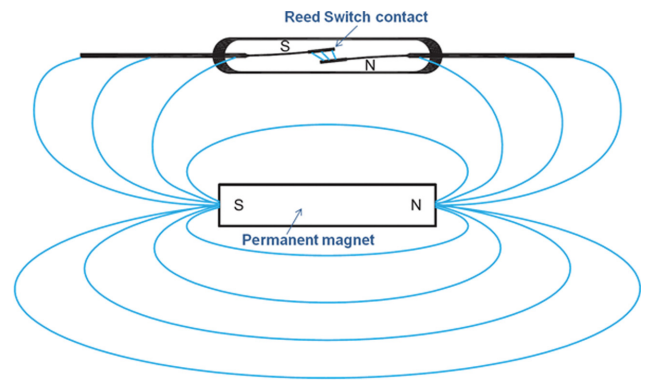


Fig. 2. (Color online) Magnetic effect between magnet and reed switch [6].

Table I. Magnetic properties according to alnico grade

Grade	Residual induction B_r	Coercivity H_c	Max. operating temp T_{mo}	Coefficient induction [20~150 °C] α	Coefficient coercivity [20~150 °C] β
AC200	7.2 kG	0.58 kOe	450 °C	-0.03%/°C	-0.03%/°C
AC300	7.0 kG	0.48 kOe	450 °C	-0.02%/°C	-0.02%/°C
AC400	5.5 kG	0.68 kOe	450 °C	-0.02%/°C	-0.02%/°C
AC500	12.7 kG	0.64 kOe	525 °C	-0.02%/°C	-0.02%/°C
AC600	10.5 kG	0.78 kOe	525 °C	-0.02%/°C	-0.02%/°C
AC800	8.5 kG	1.62 kOe	550 °C	-0.03%/°C	-0.03%/°C
AC900	10.6 kG	1.48 kOe	550 °C	-0.03%/°C	-0.03%/°C

Table II. Analysis input properties for test coil

Coil (copper)	Inner diameter	11.06 mm
	Outer diameter	16.96 mm
	Height	9.49 mm
Core (iron)	Diameter	9.06 mm
	Height	10.65 mm
Electric properties	Ampere	8~10 mA
	Turns	5,000 turns
	Magnetomotive force	40~50 A · T

III. Test Coil 전자기 해석

영구자석 전자기 해석에 앞서 Test coil에 대해 전자기 해석을 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 Test coil은 위치지 시기에 설치되는 리드스위치의 작동 여부를 검사하는 장치로서 코일과 철심으로 구성되어 있다. 본 해석에서는 코일과 철심에 8~10 mA의 전류를 0.1 mA 간격으로 인가하여 계산되는 인력과 상관관계를 확인하고자 한다. 자속밀도는 암페어 턴(Ampere-turn)과 전류, 코일의 길이에 의해 결정되며, CGS 단위로 환산된 관계식은 식(1)로 표현된다.

$$B = (0.4\pi \cdot N \cdot I) / \text{Coil length} \quad (1)$$

여기서 B는 자속밀도, N은 코일의 턴 수, I는 인가전류, Coil length는 코일 풍치의 길이를 의미한다[7]. Table II는 해석에 필요한 코일과 코어의 크기, 암페어 턴, 리드스위치의 이동 거리를 나타내었다. 해석 입력 값들을 활용하여 Fig. 3와 같이 구성된 Test coil과 리드스위치의 유효요소모델을 대상으로 전자기 해석을 수행하였다.

Fig. 4에서는 리드스위치가 Test coil을 중심으로 -30 mm~

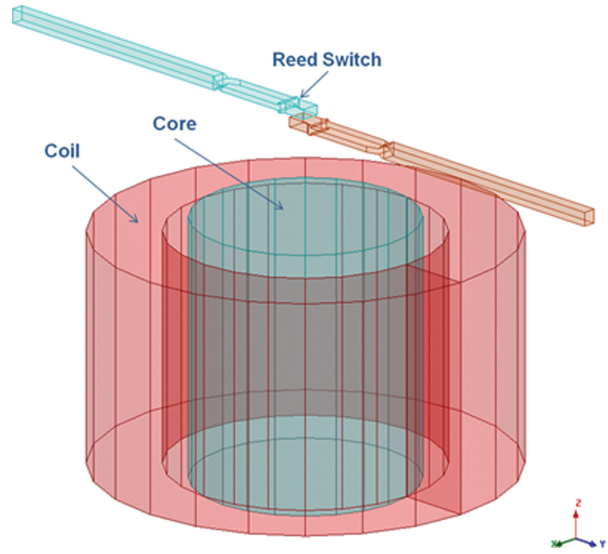


Fig. 3. (Color online) Analysis model of the test coil and reed switch.

0 mm까지 이동하면서 계산된 해석 결과를 자속밀도로 나타내었다. 해석에서 기준 위치인 0 mm는 Test coil의 코어 중심과 리드스위치 접점 중심이 일치되는 부분을 의미한다. 0 mm~+30 mm의 해석 결과는 -30 mm~0 mm 결과와 대칭이므로 나타내지 않았다. Fig. 5는 리드스위치 위치 별 발생하는 인력을 인가되는 전류 별로 나타낸 그래프이다. 자기장 분포의 방향에 따라 상부에 있는 reed blade에는 음의 인력이 발생하고, 하부에 있는 reed blade에는 양의 인력이 발생한다. 양과 음의 reed blade 간 인력 절대값의 합인 y 축의 간격이 작을수록 힘이 작게 발생하여 리드스위치가 off이 됨을 의미하고, 간격이 클수록 힘이 크게 발생하므로 리드스위치가 on이 됨을 의미한다. 해석 결과를 살펴보면 인가되는 전류가

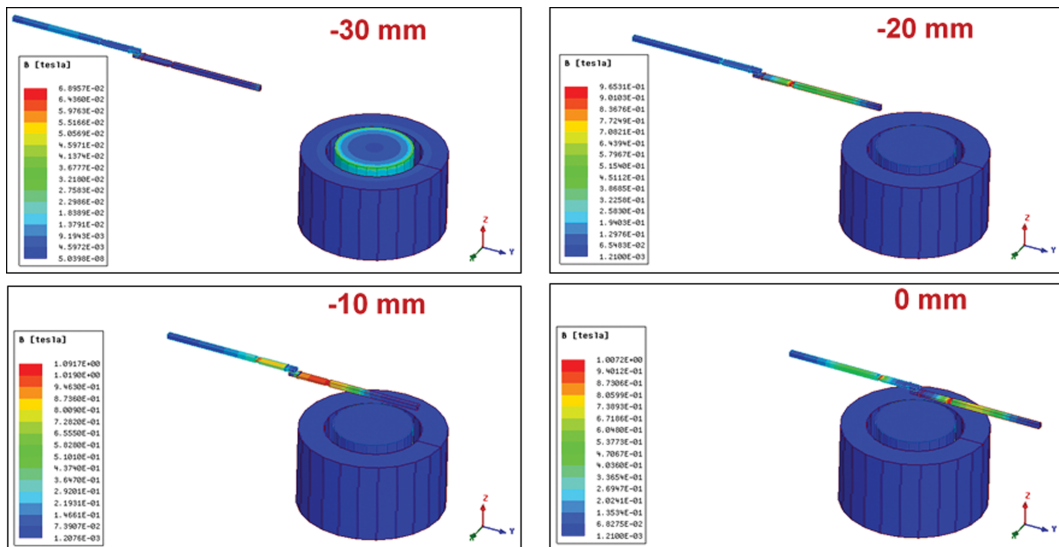


Fig. 4. (Color online) Magnetic flux density at test coil and reed switch.

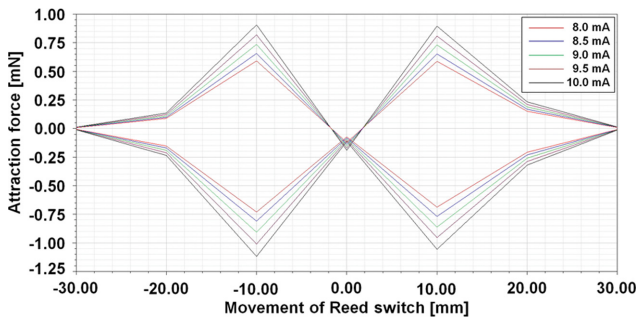


Fig. 5. (Color online) Attraction force at reed switch during movement.

클수록 리드스위치 간 인력이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 인가전류와 인력에 대한 상관관계 분석 결과, -10 mm 위치에서 전류 10 mA가 인가되었을 때 최대 인력이 발생하고 양의 인력은 0.157 mN/mA, 음의 인력은 0.194 mN/mA으로 계산된다. 음의 인력이 양의 인력보다 0.037 mN/mA 정도 크게 계산된 이유는 Test coil과 보다 가까이 있기 때문이다. 또한 양과 음의 최대 인력 차이는 -10 mm 위치에서 전류 10 mA가 인가되었을 때 2.022 mN으로 계산되었다.

IV. 영구자석 전자기 해석

영구자석의 온도에 따른 리드스위치의 인력 범위를 확인하기 위하여 총 6개의 온도구간(-180 °C, -50 °C, 20 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C)으로 나눠서 전자기 해석을 수행하였다. Table III는 해석에 필요한 영구자석의 크기, 온도에 따른 영구자석의 BH곡선 값, 리드스위치 이동거리를 나타내었다. 해석 입력 값들을 활용하여 Fig. 6과 같이 구성된 영구자석과 리드스위치의 유한요소모델을 대상으로 전자기 해석을 수행하였다.

Fig. 7에서는 리드스위치가 영구자석을 중심으로 -100 mm~0 mm까지 이동하면서 계산된 해석 결과를 지속밀도로 나타내었다. 해석에서 기준 위치인 0 mm는 Spacer의 중심과 리드스위치 점점 중심이 일치되는 부분을 의미한다. Test coil과 마찬가지로 0 mm~+100 mm의 결과는 -100 mm~0 mm의 결과와 대칭이므로 나타내지 않았다. Fig. 8에서는 리드스위치 부분에서의 지속밀도를 확인하기 위해 해석 결과를 확대하여 나타내었다.

Fig. 9은 총 6개의 온도구간에 대하여 영구자석에서 발생되

Table III. Analysis input properties for magnet

Permanent magnet (Alnico500)	Diameter	15.875 mm
	Height	44 mm
Spacer	Diameter	15.875 mm
	Height	12.7 mm

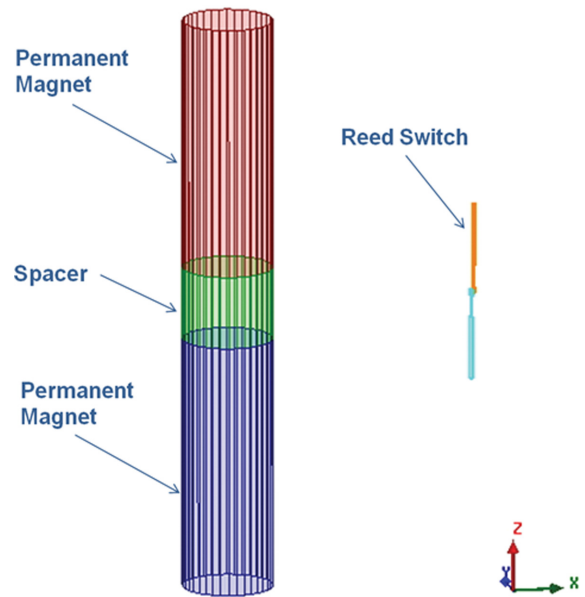


Fig. 6. (Color online) Analysis model of a permanent magnet and reed switch.

는 자기장에 의한 리드스위치의 인력을 나타낸 그래프이다. Y축 값은 reed blade에 발생하는 인력을 나타내며, 리드스위치를 구성하는 2개의 reed blade 간 인력의 합(절대값의 합)이 리드스위치에 발생하는 총인력으로 간주될 수 있다. Test

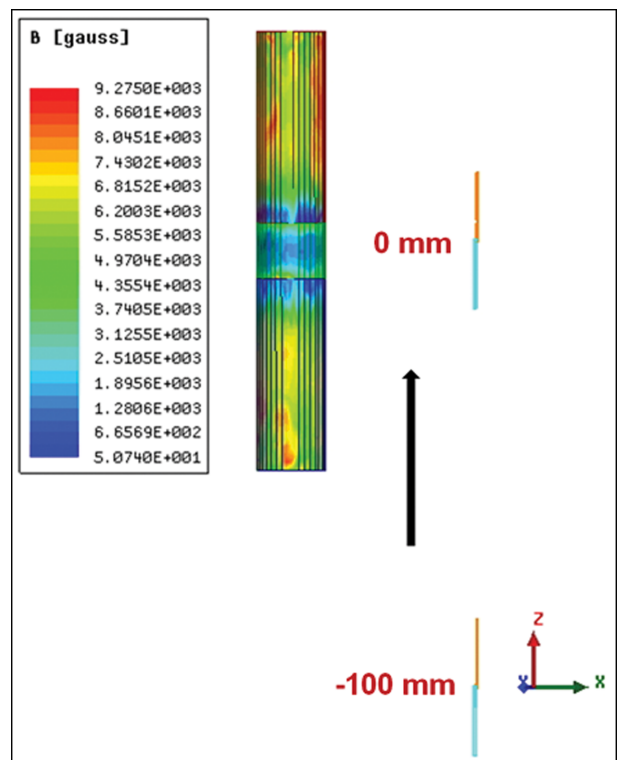


Fig. 7. (Color online) Magnetic flux density at permanent magnet and reed switch.

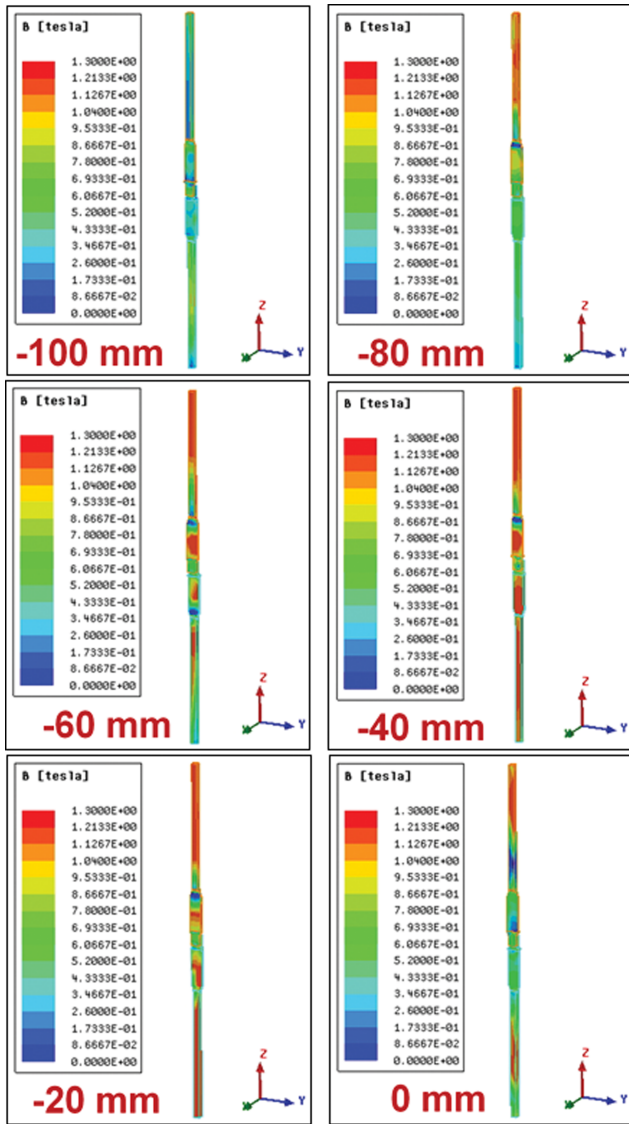


Fig. 8. (Color online) Magnetic flux density at reed switch.

coil 해석 결과와 마찬가지로 그래프에서 reed blade에 발생하는 인력의 크기에 따라 리드스위치가 on/off 됨을 나타낸다. 온도에 따른 인력의 상관관계 분석 결과를 살펴보면, 리드스위치 위치 별로 차이가 있지만 최대 인력 차이는 10 mm 위치에서 -180°C 와 300°C 사이에 3.918 mN 으로 계산되었다. 상온 20°C 와 300°C 는 최대 인력 차이가 60 mm 위치에서 1.071 mN 으로 계산되었다. 따라서 Alnico 영구자석은 온도에 따른 인력 정도가 작기 때문에 상온에서 시험한 결과를 설계에 반영해도 될 것으로 판단된다. 또한 최대 인력은 -50 mm 위치에서 300°C 일 때 32.713 mN 으로 계산되었다. Test coil에서는 리드스위치 업체에서 제공하는 암페어 턴으로 해석된 결과, 양과 음의 최대 인력 차이는 2.022 mN 으로 계산되었다. 리드스위치가 on/off되는 reed blade 간 인력에 대하여, 영구

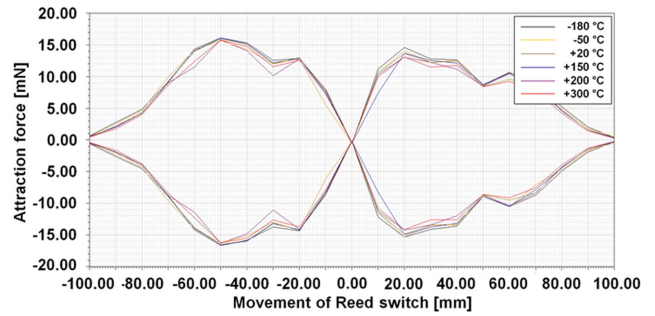


Fig. 9. (Color online) Attraction force at reed switch during movement.

자석과 Test coil의 값이 많이 차이가 나는 이유는 Test coil의 코일과 코어에 대한 정확한 물성치를 확보할 수 없어 문헌상의 일반적인 값을 사용하였기 때문으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 SMART 원자로 제어봉구동장치 위치지시기의 영구자석과 리드스위치의 정밀한 설계를 위해 Test coil과 영구자석의 전자기 해석을 수행하였다. 우선 Test coil에 인가되는 전류 별 전자기 해석을 수행하였고, 영구자석 온도 별 전자기 해석을 수행하여 리드스위치의 인력을 비교 분석하였다. 그 결과 reed blade 간 인력은 Test coil에서는 2.022 mN , 영구자석에서는 32.713 mN 으로 계산되었다. 하지만 Test coil 코일과 코어에 대한 물성치가 정확하지 않아 해석 결과 차이가 상이한 것으로 계산되었다. 향후 Test coil의 정확한 코일과 코어의 물성치가 확보되면 동등한 과정을 거쳐 재검증 할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016M2C6A1930040).

References

- [1] J. S. Lee, H. G. Jun, and Y. J. Youn, IEEE Trans. Magn. **50**, 8001004 (2014).
- [2] J. S. Lee, K. K. Kim, and J. W. Kim, KSME 15CA-FR03P-44, 326 (2015).
- [3] J. S. Lee, S. S. Cho, and J. W. Kim, J. Magn. **20**, 439 (2015).
- [4] Maxwell v17 User's guide, ANSYS Inc. (2016).
- [5] http://www.alnico-info.com/temperature_ratings.aspx.
- [6] Standex Meder Electronics, Reed technology, pp. 8~9.
- [7] <http://www.dextermag.com/resource-center/faq-hall-effect-reed-switch-sensors>.