

## Study on Radial Gap Effect on CRDM Lifting Force

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

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

(Received 17 September 2018, Received in final form 22 October 2018, Accepted 23 October 2018)

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 when electrical current is supplied to the lift and latch coils. Lifting force is decided according to magnetic substance properties, a gap between magnetic substances, and input electrical current in SMART CRDM design. In this paper, lifting force calculation according to gap and electrical input current variation of magnetic substance has been conducted by using finite element electromagnetic simulation. As a result, upper gap is large effect than bottom gap that the degree of contribution at the magnetic circuit. Also, it was confirmed that the larger the radial gap is the smaller the lifting force, and the larger input current is the larger lifting force. The results of this study are reflected in SMART CRDM design.

**Keywords** : control rod drive mechanism, gap, electrical input current, magnetic property, lifting force

## 반경 공극에 따른 제어봉구동장치 인양 하중 영향 연구

박윤범 · 이재선\* · 김종욱

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111, 34057

(2018년 9월 17일 받음, 2018년 10월 22일 최종수정본 받음, 2018년 10월 23일 게재확정)

원자력발전소의 원자로에는 노심의 반응 속도를 제어하기 위하여 인양 및 래치 코일에 전류를 부여하여 선형적으로 제어봉집합체를 구동하는 전자기 장치인 제어봉구동장치가 사용된다. 인양 하중은 제어봉구동장치 설계에 따른 자성체 특성, 자성체 간 공극, 입력 전류에 따라 결정된다. 본 논문은 유한요소 전자계해석 시뮬레이션을 활용하여 자성체 간 반경 공극 및 인양 코일의 입력 전류에 따른 인양 하중 영향을 연구하였다. 그 결과 상부 공극이 하부 공극보다 자기회로에 기여하는 정도가 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 반경 공극이 커질수록 인양 하중이 작아지고, 입력 전류가 커질수록 인양 하중이 커지는 경향을 가짐을 확인하였다. 본 연구 결과는 SMART 제어봉구동장치 설계에 반영되었다.

**주제어** : 제어봉구동장치, 공극, 입력 전류, 자성체 특성, 인양 하중

### I. 서 론

원자력발전소의 원자로에는 노심 반응 속도를 제어하기 위한 목적으로 전자기 장치인 제어봉구동장치가 사용된다[1]. 한국원자력연구원에서 개발한 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로의 제어봉구동장치는 코일에 전류가 가해지면 래치 집합체의 구동으로 인하여 래치가 구동축에 형성된 돌출턱과 맞물리면서 구동축을 작동하게 된다. 구동축의 인양 하중은 자성체의 자성 특성, 입력 전류 크기, 그리고 자성체의 공극에 따라 결정된다[2]. 본 연구에서는 자성

체 공극 및 입력 전류에 따른 인양 하중에 대한 영향을 해석적 기법으로 분석하고자 한다. 본 해석을 위해 상용 전자계해석프로그램인 ANSYS Electromagnetics Suite[3]을 활용하여 계산하고, 본 연구 결과를 토대로 정지 인양 고정자와 모터 하우징 사이의 반경 방향 공극 및 인양 코일의 입력 전류에 따른 인양 하중의 상관관계를 파악하였다. 그 결과는 SMART 제어봉구동장치의 설계에 반영되었으며, 제어봉구동장치 시제품을 이용한 성능시험에서 검증될 예정이다.

### II. 해석모델

SMART 제어봉구동장치 부품 구성의 이해를 돕기 위해 Fig. 1과 같이 단면도를 표시하였다[4].

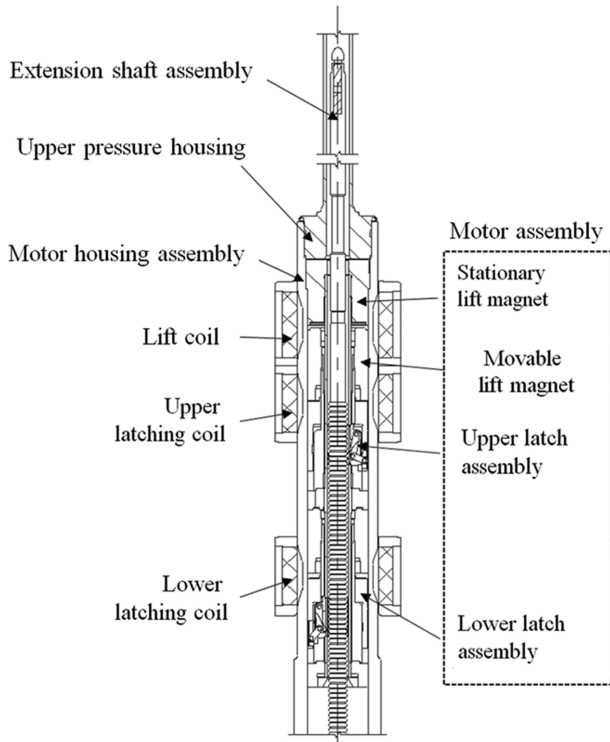


Fig. 1. CRDM configuration.

제어봉구동장치의 전자계해석을 위해 본 연구의 대상 부품인 정지 인양 고정자, 모터 하우징, 인양코일, 인양 코일 하우징, 이동 인양 고정자, 상부 래치 코일로 해석모델을 Fig. 2와 같이 구현하였다.

정지 인양 고정자와 모터 하우징 사이에 반경 공극을 구분하고자 상부 공극과 하부 공극으로 나뉘었으며, 입력 전류는 인양 코일에 부여하였다.

상부 공극은 0 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm 6개로 분류하였고, 하부 공극 역시 0 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm 6개로 분류하여 총 36개의 입력조건을 부여하였다.

입력 전류는 5 A에서 20 A 사이를 0.2 A 단위로 나눠 총 75개의 입력조건을 부여하였다.

여기서 자기력 즉 인양 하중  $F_p$ 의 관계식은 식(1)와 같다.

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_g \cdot I_g^2}{l_g^2} \quad (1)$$

인양 하중  $F_p$ 는 공극의 단면적  $A_g$ , 공극의 길이  $l_g$ , 그리고 투자율  $\mu_0$ 에, 추가적으로 코일의 턴수  $N$ 과 코일에 입력되는 전류  $I_g$ 의 관계식으로 나타낼 수 있다. 본 관계식에서 알 수 있듯이 인양 하중은 입력 전류의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 하지만 정지 인양 고정자와 이동 인양 고정자 간의 길이 공극으로 표현된 식으로는 Fig. 2에 도시된 상, 하부 반경 공

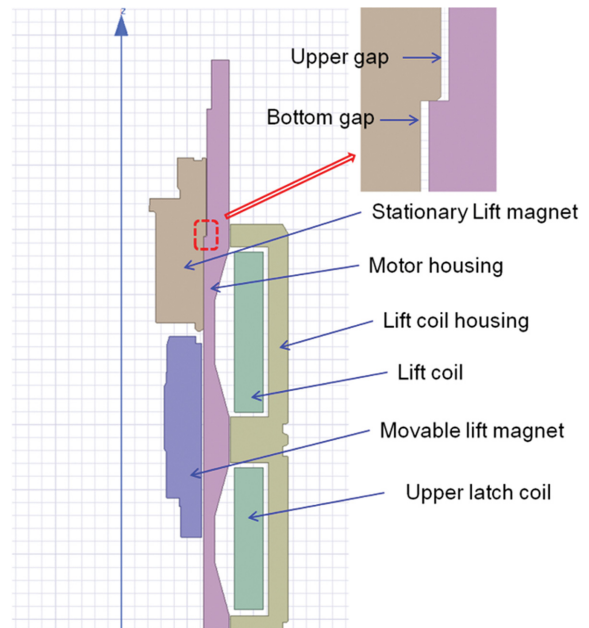


Fig. 2. (Color online) CRDM analysis model.

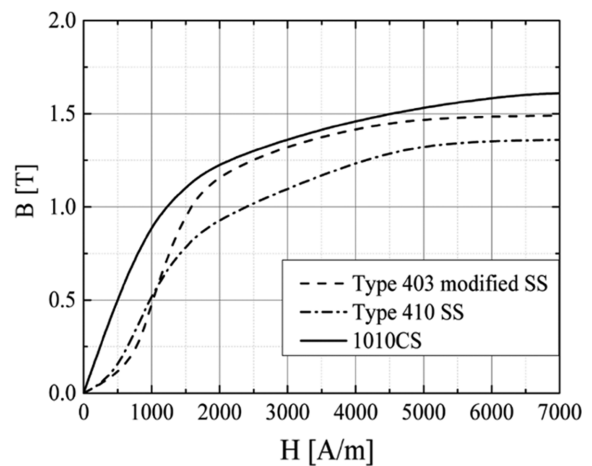


Fig. 3. B-H curve of CRDM materials.

극에 따른 인양 하중을 구할 수 없다. 따라서 형상 정보와 자성체의 특성을 반영한 정확한 인양 하중을 계산하기 위해서는, 상용 전자계 해석프로그램의 활용이 필요하다[2].

본 해석에 사용된 재질 별 B-H 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 가로축은 자계의 세기  $H$ , 세로축은 자속밀도  $B$ 를 의미한다. 정지 인양 고정자와 이동 인양 고정자는 Type 410 스테인레스강, 모터 하우징은 Type 403 modified 스테인레스강, 인양 코일 하우징은 1010CS 재질이 사용되었다[4].

### III. 전자계해석

실제 자성 특성과 형상을 최대한 고려하여 앞에서 설명된

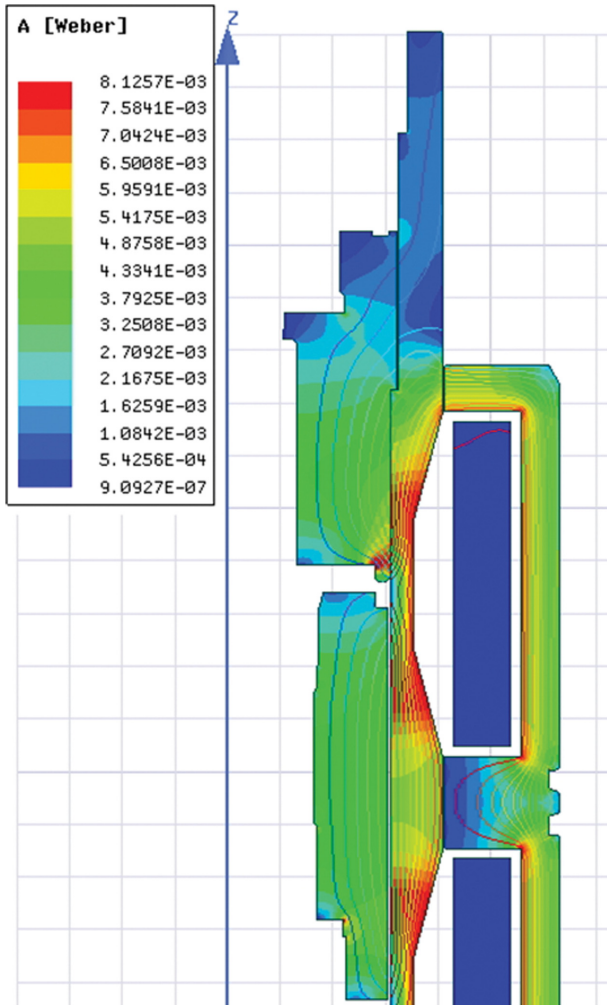


Fig. 4. (Color online) Flux flow of analysis result.

해석모델과 입력 데이터를 기준으로 전자계해석을 수행하였다. 해석 결과의 설명을 돕기 위해 전자계해석 결과 중 자기력의 flux flow를 Fig. 4에 나타내었다.

우선 인양 고정자와 모터 하우징 사이의 상, 하부 반경 공극에 따른 인양 하중 값을 비교하였고, 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 입력 전류 10 A일 때 상부 공극이 고정되고 하부 공극이 변할 때의 인양 하중 값을 나타내었다. 또한 Fig. 6은 입력 전류 10 A일 때 하부 공극이 고정되고 상부 공극이 변할 때의 인양 하중 값을 나타내었다.

해석 결과에서 확인할 수 있듯이, 인양 하중은 상, 하부 반경 공극이 클수록 작아짐을 알 수 있었다. 왜냐하면 일반적으로 공극이 커질수록 공극 저항에 의해 자기력이 작아지기 때문이다.

Fig. 6을 보면, 상부 공극이 0 mm이고 하부 공극이 변할 때 인양 하중은 약 1 kN으로, 하부 공극만으로는 인양 하중에 크게 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

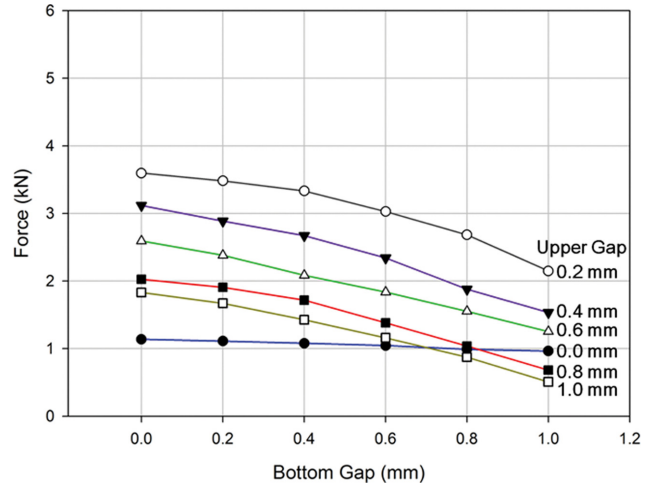


Fig. 5. (Color online) Lifting force by bottom gap at fixed upper gap and input current 10 A.

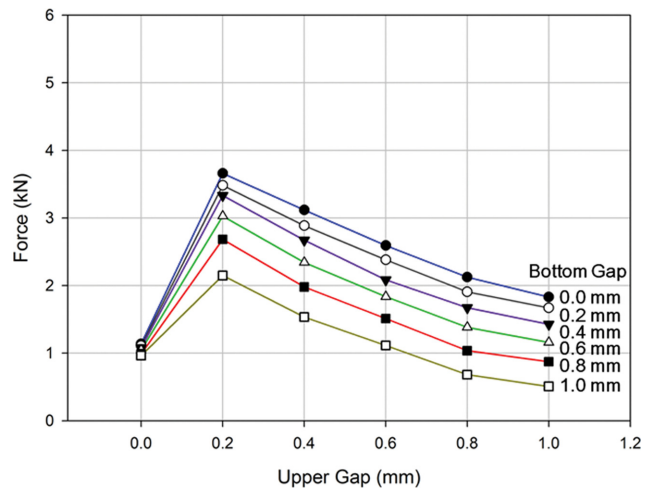


Fig. 6. (Color online) Lifting force by upper gap at fixed bottom gap and input current 10 A.

또한 하부 공극이 고정되고 상부 공극이 변할 때의 인양 하중은 상부 공극이 0.2 mm일 때 인양 하중이 최대값을 가지게 되고, 그 이후에서는 인양 하중이 작아짐을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 4에서 자기력의 flux flow는 상부 공극보다 하부 공극의 자기에너지가 낮은 상태로 자기회로를 구성하게 되고, 상대적으로 상부 공극보다 하부 공극의 자기력 밀도가 높으며, 하부 공극은 포화된 상태이기 때문이다. 즉, 자성체 형상 및 자성 특성에 따라 상부 공극이 하부 공극보다 자기 회로에 기여하는 정도가 크다고 추측할 수 있다.

Fig. 7은 상부 공극 0.4 mm, 하부 공극 0.6 mm일 때 입력 전류에 따른 인양 하중을 나타내었다. 식(2)에 나타낸 바와 같이 인양 하중은 전류의 제곱에 비례하기 때문에 그래프와 같은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 즉, 입력 전류의 값이

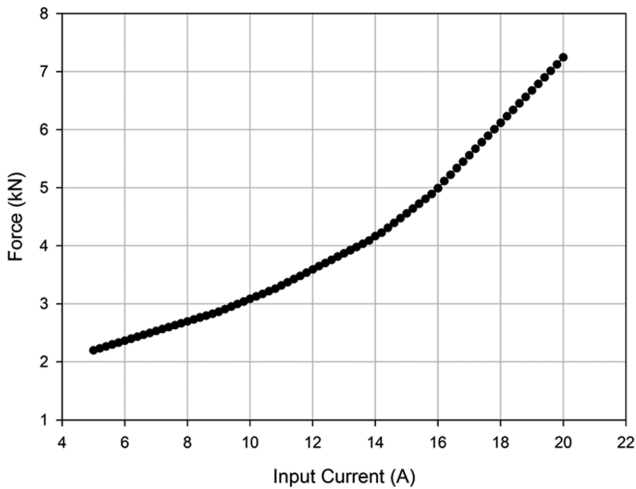


Fig. 7. Lifting force by input current at upper gap 0.4 mm, bottom gap 0.6 mm.

클수록 인양 하중은 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 상용로 제어봉구동장치 성능시험에서의 입력 전류에 따른 인양 하중 값에서도 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다[1].

#### IV. 결 론

본 연구에서는 SMART 원자로 제어봉구동장치 설계에서

인양 고정자와 모터 하우징 사이의 상, 하부 공극 및 인양 코일의 입력 전류에 따른 인양 하중 영향 연구를 위해 전자 계해석을 수행하였다. 그 결과 자성체 형상 및 자성 특성에 따라 상부 공극이 하부 공극보다 자기회로에 기여하는 정도가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반경 공극이 커질수록 인양 하중이 작아지고, 입력 전류가 커질수록 인양 하중이 커지는 경향을 가짐을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 SMART 제어봉구동장치 설계에 반영되었으며, 시제품을 이용한 성능시험에서 검증될 예정이다.

#### 감사의 글

This study was supported by the National Research Foundation (NRF) grand funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT) (No. 2016M2C6A1930040).

#### References

- [1] J. S. Lee, H. G. Jun, and Y. J. Youn, IEEE Trans. Magn. **50**, 8001004 (2014).
- [2] Y. B. Park, J. S. Lee, S. Al-Harbi, and J. W. Kim, KSME 18EP-03A03 (2018).
- [3] Maxwell v17 User's guide, ANSYS Inc. (2016).
- [4] J. S. Lee, G. M. Lee, and J. W. Kim, J. Magn. **21**, 586 (2016).