

# 스프링조작기를 가진 고압회로차단기의 스프링 모델링에 관한 연구

이승규<sup>†</sup>·김승오<sup>\*</sup>·유완석<sup>\*\*</sup>·손정현<sup>\*\*\*</sup>

## Study on the spring modeling of circuit breaker with spring operating mechanism

Seung-Kyu Lee, Seung-Oh Kim, Wan-Suk Yoo and Jeong-Hyun Sohn

**Key Words:** Circuit Breaker(고압 회로차단기), Spring Operating Mechanism(스프링 조작기), Flexible Multibody Dynamics(탄성 다물체동역학), Modal Analysis(모드해석)

### Abstract

Since the performance of the circuit breaker mainly depends on the spring operating mechanism, the analysis of the spring operating mechanism is required. The spring, especially closing spring, stores the deformation energy due to the compression and then accelerates the big loads rapidly in the circuit breaker. To accurately carry out the kinematic and dynamic analysis of the circuit breaker, the precise modeling of the spring behavior is necessary. In this paper, the static stiffness of the spring is captured by using the tester. When the spring is used in the circuit breaker, it is installed horizontally. Therefore, Sine excitation tests are carried out horizontal and vertical direction. Three types of spring models such as a linear spring model, modal spring model, and nodal spring model are suggested and compared with the experimental results.

### 1. 서 론

회로차단기는 회로에 전류가 흐르고 있는 상태에서 그 회로를 개폐한다든지 또는 차단기 부하측에서 단락사고 및 지락사고가 발생했을 때 신속히 회로를 차단할 수 있는 능력을 가진 기기이다. 회로차단기는 스프링의 힘을 구동동력으로 하는 스프링 타입의 조작기가 주로 이용되는 데 이것은 구조가 간단하면서 30~40ms의 짧은 시간

에 큰 부하를 가진 종동절을 높은 가속도로 써 움직이게 할 수 있기 때문이다. 회로차단기의 성능은 차단속도에 의해 결정되는데, 스프링 조작기는 차단속도에 결정적인 역할을 한다. 스프링 조작기 내에서 스프링은 압축되어 스프링에너지 를 저장하였다가 신호에 따라 아주 빠른 속도로 방출(release)된다. 스프링 조작기 내의 스프링은 큰 차중을 가지고 있으며, 횡 방향으로 누워있어서 자중 및 압축에 의한 굽힘 현상도 발생된다. 스프링이 조작기의 성능에 많은 영향을 미치므로, 스프링의 동적 거동을 정확히 모델링하고 해석할 필요가 있다.

스프링은 기능면에서 에너지 흡수, 에너지의 저장 및 복원, 진동 및 충격의 완화 등의 목적을

<sup>†</sup> 부경대 대학원

E-mail : seungkyu@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1621 FAX : (051)620-1405

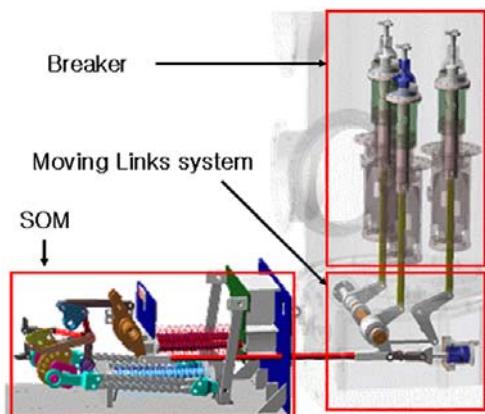
<sup>\*</sup> 삼성전자

<sup>\*\*</sup> 부산대

<sup>\*\*\*</sup> 부경대 기계공학부

위하여 필요한 형상으로 제작되는 기계요소 중에서 가장 기초적이고 중요한 요소라고 할 수 있다. 고압 회로차단기에서는 무거운 부하를 높은 가속도로 운동시키기 위하여 큰 힘을 가진 스프링을 사용하므로 스프링의 질량도 상대적으로 크다. 따라서 동적거동시에 경계조건의 변화와 스프링의 자중에 의한 굽힘변형도 발생한다.

회로차단기의 조작기구부는 캠과 많은 링크류, 스프링, 림퍼 등이 있어 시스템이 복잡함에도 불구하고 기구동역학 측면에서 많은 연구가 이루어지지 못하였다. 또한 조작기내의 스프링 특성에 대한 연구도 많이 이루어지지 못한 실정이다.



**Fig. 1** Spring operating system in circuit breaker

코일 스프링을 염밀히 해석하기 위해서는 각 방향의 운동이 매우 복잡하게 연계되어 있고 특성이 편미분방정식 형태의 운동방정식으로 기술되므로 그 해석에 많은 노력이 필요하다.

Paranjpe(1990)는 스프링을 분포질량과 분포강성의 조합으로 표현되는 분포매개변수(distributed parameter) 모델을 제안하였으며, Sakai(1976)와 Kim(1993)은 스프링을 집중질량(lumped mass)과 등가강성(equivalent stiffness)의 조합으로 표현되는 집중매개변수(lumped parameter)모델을 제안하였다. Ahn(2003)은 진공회로차단기의 모델링에 집중매개변수 모델을 적용하였다.

탄성 다물체동역학 해석에서는 물체의 탄성변형을 고려하기 위해 모드좌표(modal coordinates)를 주로 이용하고 있다.

본 연구에서는 정적 시험기를 이용하여 스프

링의 강성을 측정하고, 스프링을 3가지 모델, 즉, 선형모델(linear model), 모드모델(modal model), 절점모델(nodal model)로 모델링 하였다. 세 가지 스프링 모델을 이용한 시뮬레이션과 시험결과를 비교하였다. 스프링 특성시험을 2장에 나타내었고, 스프링 모델링을 3장에, 시험 및 시뮬레이션과의 비교를 4장에 기술하였으며, 결론을 5장에 나타내었다.

## 2. 스프링 시험

### 2.1 정적 시험

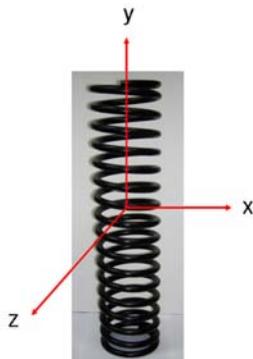
Fig.1에 있는 정적시험기(UH-F100A)가 스프링의 강성을 측정하기 위해 사용되었다. 일본의 Shimadzu에서 제작된 것으로 최대하중 100톤이다. 최대 변위 200mm를 10mm/min의 속도로 측정하였다. Table 1에 본 연구에 사용된 스프링의 스펙을 나타내었고 Fig. 2에 스프링 형상과 좌표계를 나타내었다.



**Fig. 1** Material tester measuring spring characteristics

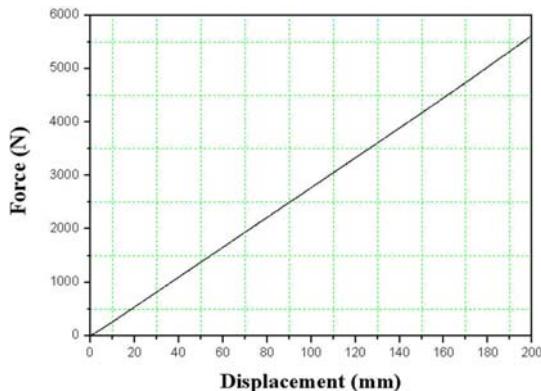
**Table 1** Specifications of spring

Outer diameter	133.5mm
Inner diameter	102.5mm
Free length	629mm
Active number of turns	16



**Fig. 2** Spring configuration

Fig. 3에 정적 시험결과를 나타내었다. 본 연구에 사용한 스프링은 강성이  $28.17\text{N/mm}$ 로써 선형적인 특성을 보여주었다.



**Fig. 3** Static test result

## 2.2 동적 시험

스프링이 회로차단기의 스프링 조작기에 설치될 때 수평방향으로 설치되기 때문에 본 연구에서는 이점을 고려하여 동적시험을 스프링의 수직방향과 수평방향으로 나누어 실시하였다. Fig. 4,5에 동적시험지그와 가진기(actuator)를 나타내었다. 본 시험에 사용된 가진기는 MTS사의 25ton가진기이다.

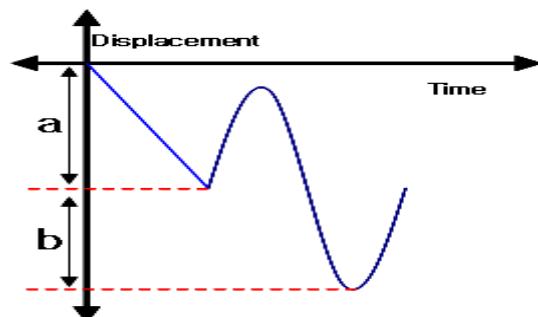


**Fig. 4** A MTS machine for the vertical dynamic test

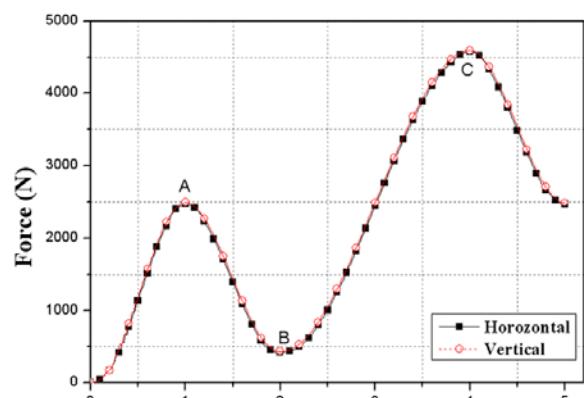


**Fig. 5** A MTS machine for the horizontal dynamic test

동적 시험은 스프링을 100mm압축한 상태에서 진폭이 100mm인 사인가진을 입력으로 하였고 총 3번의 시험을 실시하였다. 아래의 Fig.6은 사인가진스펙을 보여주고 있다. Fig.6에서 "a"는 사인가진 하기 전에 초기 압축량을, "b"는 사인가진의 진폭(amplitude)을 의미한다. 본 연구에서는 초기 압축량(a)을 100mm, 진폭(b)을 100mm를 사용하였다.



**Fig. 6** Specifications of sine excitation



**Fig. 7** Spring forces according to time

위의 Fig.7은 수직가진시험과 수평가진시험의 결과를 나타낸 것이다. A,B 그리고 C점에서 각각 1.4%, 3.5%, 0.4%의 차이를 보이고 있었다.

### 3. 스프링 모델링

#### 3.1 선형 모델

스프링의 선형모델은 스프링의 변위와 복원력의 관계로부터 유도되며 식(1)과 같이 표현된다. 여기서,  $k$ 는 스프링 강성,  $x$ 는 스프링 변위,  $F$ 는 스프링력을 나타내며 스프링강성은 실험으로부터 구해진다.

$$F = kx \quad (1)$$

#### 3.2 모드 모델

모드모델을 위해서는 유한요소모델이 필요하며 본 연구에서는 MSC/Patran을 이용하여 유한요소모델을 생성하였다. Fig. 8는 스프링 유한요소모델의 일부분을 보여주고 있으며 Fig. 9은 고유진동수에 따른 모드형상을 보여주고 있다. Table 2은 모델링에 사용된 데이터이다. Table 3은 고유진동수를 나타낸다. Table 3에서 x, y, z-axis는 Fig.2에서 나타낸 좌표축을 의미한다. 헥사요소(hexa element)를 사용하였으며, 동역학해석은 상용프로그램인 RecurDyn을 이용하였다. 모드좌표를 이용한 탄성체해석을 위해서 MSC/Patran에서 \*.bdf 파일을 생성하였으며, \*.bdf파일은 MSC/Natran을 넘겨져서 \*.pch 파일이 생성된다. 최종적으로 RecurDyn에서 \*.pch파일을 불러서(importing) 탄성체를 정의하게 된다. 유한요소모델의 전체 절점 수는 37,316개이며, 전체자유도는 223,914이다.

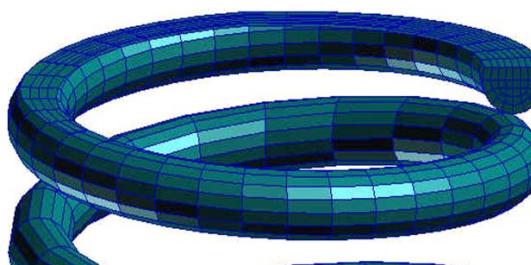


Fig. 8 FEM model of spring

Table 2 Modeling data of spring

Number of nodal points	37316
Number of elements	31042
Total degrees of freedom	223914
Young's modulus	2.1E+5 (N/mm <sup>2</sup> )
Poisson's ratio	0.3
Density	7.6E-6 (Kg/mm <sup>3</sup> )

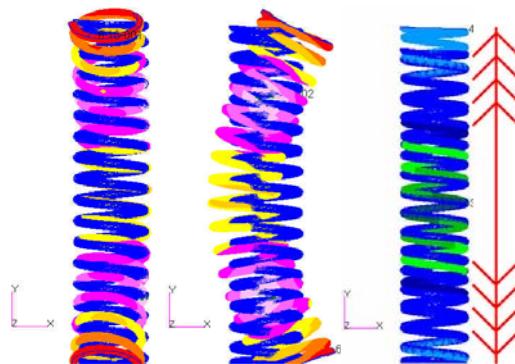


Fig. 9 Mode shapes of spring

Table 3 Modeling data of spring

Mode no.	Mode type	f(Hz)
1	Symmetric(rotation about x-axis)	0.4552
2	Symmetric(rotation about z-axis)	0.4553
3	Axial	0.734

#### 3.3 절점 모델

RecurDyn은 탄성체를 모델링하는 데에 상대절점좌표를 사용하여 모델링하는 툴을 제공하고 있다. 본 연구에서는 RecurDyn에서 제공하는 MFBD 모듈을 이용하여 스프링의 절점모델을 구성하였으며, 이는 스프링의 유한요소모델의 절점좌표를 동역학해석에서 그대로 사용한다는 의미이다. 기구의 지그(jig)와 탄성체 사이는 접촉력(contact forces)을 사용하여 표현하였으며, Fig.8의 상부에 표시되어 있는 평평한 면을 RecurDyn의 Patch set을 사용하여 지그와 접촉되는 접촉면을 정의하였다. 스프링의 정적시험시에 권선간의 접촉은 관찰되지 않았으므로, 권선간의 접촉은 고려하지 않았다.

## 4. 성능비교

### 4.1 정적 시험과 비교

RecurDyn을 이용하여 정적시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 시험과 비교하였다. Fig.10은 정적시험 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며 Table 4에는 세 가지 모델의 정확성과 효율성을 나타내었다. Table 4에서 RMS는 오차제곱평균(root mean square)를 의미하며, Max error는 최대 오차를 뜻한다. 정확성 면에서는 세 가지 모델 모두 오차범위 내에서 거의 비슷한 경향을 보여주고 있으나, 효율성 면에서는 선형 모델이 다른 모델에 비해 탁월한 성능을 보여주고 있다.

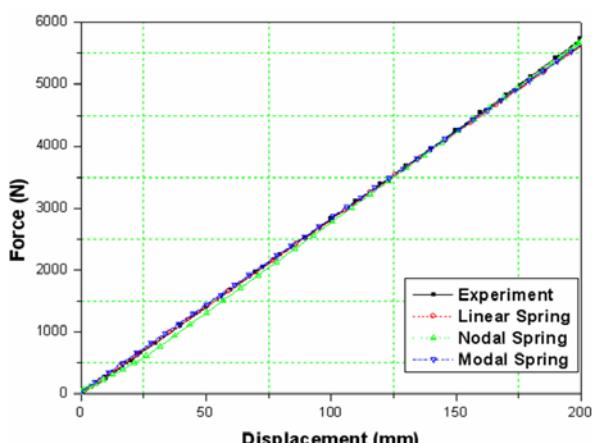


Fig. 10 Comparison of static test results

Table 4 Comparison of errors of each model with

		Linear	Modal	Nodal
Accuracy	RMS ratio(%)	1.1	1.6	1.4
	Max error(%)	1.8	1.6	2.4
Efficiency	CPU times(s)	5	621	11520

### 4.2 동적 시험과 비교

스프링이 회로차단기내의 스프링조작기에 설치될 때, 스프링은 수평으로 누운 상태로 설치된다. 따라서, 스프링의 수평방향으로 눌려져 있을 때의 특성이 조사될 필요가 있다. 아래의 Fig. 11은 수

평방향 시험 및 시뮬레이션 결과를 나타내고 있으며 Table 5는 스프링 모델들과 시험과의 오차를 나타내고 있다. 절점모델 스프링의 경우 시험과 비슷한 경향을 보이고 있지만 선형스프링과 모드모델 스프링의 경우 A, B 그리고 C점에서 다른 경향을 보이고 있다.

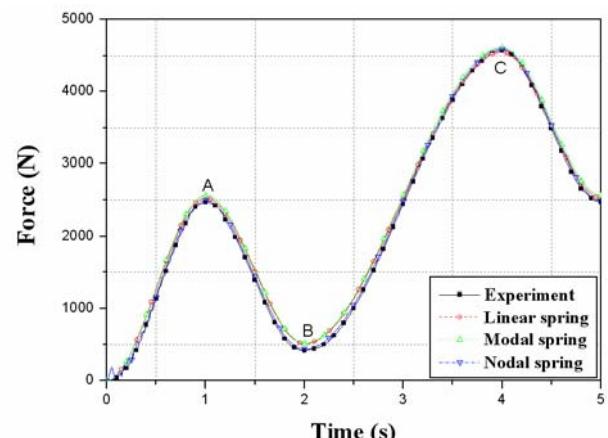


Fig. 11 Comparison of horizontal dynamic test results

Table 5 Comparison of errors of each model with experiment

	RMS error(N)	PEAK error (%)		
		A	B	C
Linear spring	31.32	2.2	22.1	0.6
Modal spring	42.43	3.6	23.9	0.8
Nodal spring	23.08	0.8	5.2	0.4

## 5. 결 론

본 연구에서는 정적시험기를 이용하여 스프링의 정적강성을 측정하였다. 스프링을 세 가지 모델, 즉 선형모델, 모드모델, 절점모델로 모델링을 하였으며, 정적시험결과와 시뮬레이션을 비교하였다. 정적시험의 경우, 세 가지 모델 모두 비슷한 경향을 보였으며, 해석에 소요되는 시간은 선형모델이 탁월하게 우수한 것으로 조사되었다. 회로차단기에 사용되는 스프링조작기에서 스프링은 수평방향으로 누운 상태로 장착되기 때문에 스프링을 수평방향으로 눌려져 있을 때의 특성을 사인가진시험을 통해 조사하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 정적시험의 경우 선형, 모드, 절점 스프링 모델 모두 정확성면에서는 오차범위 이내에서 거의 비슷한 경향을 보였으나 효율성 측면에서는 선형스프링이 제일 좋은 결과를 보여주었다.
- (2) 스프링이 수평방향으로 누워있을 때를 시험과 시뮬레이션을 비교했을 때, 절점모델이 시험과 비슷한 경향을 보여주었다.

따라서, 스프링을 단순히 모델링 할 경우는 스프링의 선형적인 특성과 효율적인 측면을 고려해서 선형모델이 가장 낫다고 판단되며, 차단기와 같이 스프링이 수평으로 누운 상태로 설치될 때에는 모드좌표를 이용한 모드모델이 정확성 측면에서 낫다고 사료된다. 차단기 전체에 미치는 영향은 추후 연구결과에서 고려해 볼 만한 사항이다.

#### 후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-331-D00020)

#### 참고문헌

- (1) Paranjpe, R.S., 1990, "Dynamic Analysis of a Valve Spring With a Coulomb-Friction Damper", *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 412~422.
- (2) Sakai, H. and Kosaki, H., 1976, "Analysis of Valve Motion in Overhead Valve Linkage-Roles of Valve Spring Surge in Valve Motion", *J. of the Faculty of Eng. Uni. of Tokyo(B)*, Vol. XXXIII, No. 4, pp. 441~446.
- (3) Kim, S.H., 1993, "Dynamic Analysis of a Helical Spring Using an Extended Finite Difference-type Numerical Scheme," *Ph.D Thesis*, KAIST, Taejon, Korea.
- (4) Ahn, K.Y., Kim, S.H., 2003, "Influence of Spring Dynamics and Friction on Dynamic Responses in a Spring-Driven Cam," *Transactions of the KSME (A)*, Vol.27, No.2, pp. 247~254.
- (5) RecurDyn Theoretical Manual, 2006, Ver 6.0, FunctionBay Co.