

< 논문 >

## 회로차단기용 스프링조작기의 기구동역학 해석을 위한 스프링모델링 기법 연구

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

(2007년 3월 28일 접수, 2007년 6월 21일 심사완료)

### Study of Spring Modeling Techniques for Kinematic and Dynamic Analysis of a Spring Operating Mechanism for the Circuit Breaker

Jeonghyun Sohn, Seungkyu Lee, Seungoh Kim and Wan-Suk Yoo

**Key Words :** Circuit Breaker(회로차단기), Spring Operating Mechanism(스프링조작기), Flexible Multibody Dynamics(탄성다물체동역학), Modal Analysis(모드해석), Spring Stiffness(스프링강성)

#### 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. A simple mechanism similar to the spring operating mechanism was designed to generate the release motion of the spring. A high speed camera was used to capture the behavior of the spring. 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. 서론

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 30~40ms 의 짧은 시간에 큰 부하를 가진 중동질을 높은 가속도로써 움직이게 할 수 있기 때문이다. 회로차단기의 성능은 차단 속도에 의해 결정되는데, 스프링 조작기는 차단 속도에 결정적인 역할을 한다.

스프링조작기 내에서 스프링은 압축되어 스프링에너지를 저장하였다가 신호에 따라 아주 빠른 속도로 방출(release)된다. 스프링 조작기 내의 스프링은 큰 자중을 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 위하여 필요한 형상으로 제작되는 기계요소 중에서 가장 기초적이고 중요한 요소라

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1539 FAX : (051)620-1405

<sup>\*</sup> 부경대학교 대학원

<sup>\*\*</sup> 삼성전자

<sup>\*\*\*</sup> 회원, 부산대학교 기계공학부

고 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, 댐퍼 등이 있어 시스템이 복잡함에도 불구하고 기구동역학 측면에서 많은 연구가 이루어지지 못하였다. 또한 조작기내의 스프링 특성에 대한 연구도 많이 이루어지지 못한 실정이다.

코일 스프링을 엄밀히 해석하기 위해서는 각 방향의 운동이 매우 복잡하게 연계되어 있고 특성이 편미분방정식 형태의 운동방정식으로 기술되므로 그 해석에 많은 노력이 필요하다. 따라서 코일 스프링의 해석은 유한요소법을 이용하여야 수행할 수 있으며 복잡한 하중, 경계조건 문제에 대한 해를 구할 수 있다.

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. 한편, 물체의 탄성효과를 고려하기 위해 물체전체(entire body)의 절점변위(nodal displacement)와 회전(rotation)을 표현하는 탄성절점좌표(elastic nodal coordinates)는 유한요소법(finite element method)을 이용하여 얻을 수 있다. 탄성좌표의 수를 줄이기 위해서 변형모드(deformation modes)의 선형조합으로 모드좌표(modal coordinates)를 근사화 시킬 수 있다(shin 1993). 모드 좌표를 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용하면, 효율성은 증가하나 경계조건을 바꾸기가 어렵고 대변형 문제에는 적절한 답을 줄 수 없다. 탄성다물체 동역학 해석에서는 물체의 탄성변형을 고려하기 위해 모드좌표(modal coordinates)를 주로 이용하고 있다.

본 연구에서는 정적 시험기를 이용하여 스프링의 강성을 측정하고, 스프링을 3 가지 모델, 즉, 선형모델(linear model), 모드모델(modal model), 절점 모델(nodal model)로 모델링 하였다. 스프링을 압축한 후 순간적으로 방출할 수 있는 간단한 기구를 제작하여 에너지 방출시험을 행하였으며, 고속 카메라를 이용하여 스프링 끝단의 변위를 계측하였다. 세 가지 스프링 모델을 이용한 시뮬레이션과 시험결과를 비교하였다. 스프링 특성시험을 2 장에 나타내었고, 스프링 모델링을 3 장에, 기구 시험

및 스프링의 수직, 수평 가진시험과 시뮬레이션과의 비교를 4 장에 기술하였으며, 결론을 5 장에 나타내었다.

## 2. 스프링 특성시험

### 2.1 정적 시험

Fig. 1 에 있는 정적시험기(UH-F100A)가 스프링의 강성을 측정하기 위해 사용되었다. 일본의 Shimadzu 에서 제작된 것으로 최대하중 100 톤이다. 최대 변위 200mm 를 10mm/min 의 속도로 측정하였다. Fig. 2 에 스프링 형상과 좌표 계를 나타내었다. 스프링은 외부직경 133.5mm, 내부직경 102.5mm, 유효권수(active number of turns) 16, 자유길이 629mm 이다. 정적시험 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 시험결과, 본 연구에 사용한 스프링은 강성이 22.5N/mm 로써 선형적인 특성을 보여주었다.

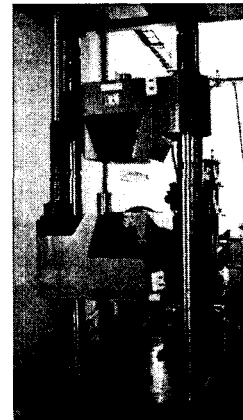


Fig. 1 Static tester(UH-F100A)

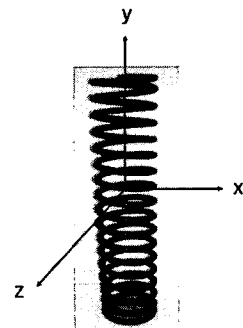


Fig. 2 Spring configuration

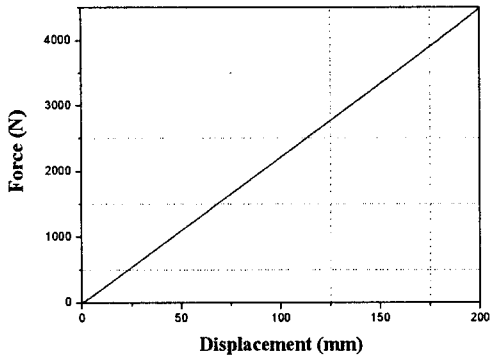


Fig. 3 Static test results

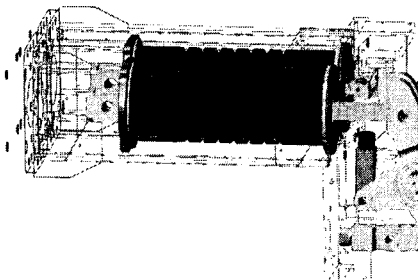


Fig. 4 Spring operating mechanism

2.2 에너지 방출 시험

스프링조작기 내에서 스프링은 압축 후에 순간적으로 방출된다. 그러므로, 에너지 방출 시험을 할 필요가 있다. Fig.4 에 고압 회로차단기의 스프링조작기의 일부를 나타내었다. 본 연구에서는 스프링조작기를 대체하여 스프링 방출 시험을 하기 위해 간단한 기구를 제작하였다. Fig. 5 에 본 연구에서 사용한 기구를 나타내었다. 스프링은 모터동력으로 압축된 후, 레버를 당김으로써 방출되도록 고안하였다.

스프링이 방출될 때 아주 빠른 속도로 움직이므로, 고속카메라를 이용하여 거동을 계측하였다. 고속카메라는 초당 1000 프레임을 찍을 수 있는 것을 사용하였다. Fig. 6 에서 보듯이 스프링의 끝점을 추적점(tracking point)으로 하였으며, 운동분석기(motion analyzer)를 사용하여 선택된 점의 궤적을 분석하였다. Fig. 7 에 압축했을 때의 스프링 모습을 나타내었다. 스프링이 200mm 정도 압축되었을 때 스프링의 중심영역(center region)이 아래로 처지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8 에 트래킹점의 운동궤적을 도시하였다. 스프링의 끝점은 수평뿐만 아니라 수직으로도 움직이는 것을 알 수 있다.

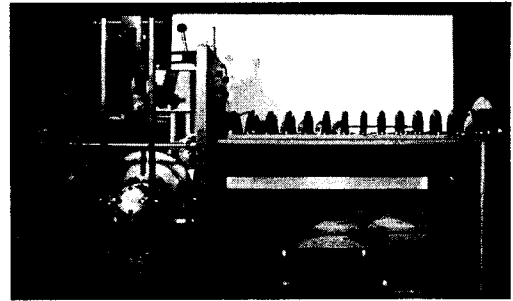


Fig. 5 A mechanism to test the release motion



Fig. 6 Tracking point

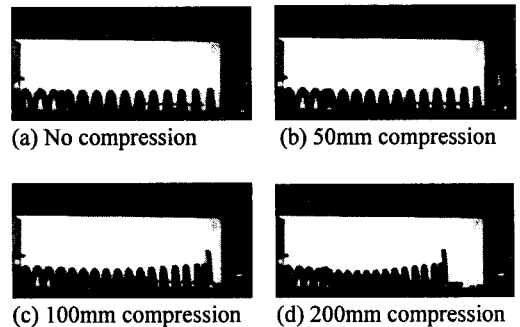


Fig. 7 Compression test results

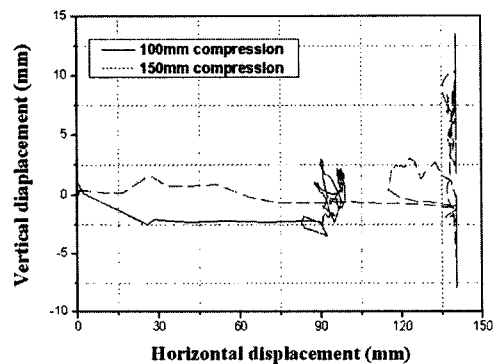


Fig. 8 Configuration of tracking point

### 3. 스프링 모델링

#### 3.1 선형모델

스프링의 선형모델은 스프링의 변위와 복원력의 관계로부터 유도되며 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, k는 스프링 강성, x는 스프링 변위, F는 스프링력을 나타낸다. 스프링강성은 실험으로부터 구해진다.

#### 3.2 모드모델

모드모델을 위해서는 유한요소모델이 필요하며 본 연구에서는 MSC/Patran 을 이용하여 유한요소 모델을 생성하였다. Fig. 9 는 스프링 유한요소모델의 일부분을 보여준다. Table 1 은 모델링에 사용된 데이터이다. Table 2 는 고유진동수를 나타낸다. Table 2 에서 x, y, z-axis 는 Fig.2 에서 나타낸 좌표축을 의미한다. 헥사요소(hexa element)를 사용하였으며, 동역학해석은 상용프로그램인 RecurDyn 을 이용하였다. 모드좌표를 이용한 탄성체해석을 위해서 MSC/Patran 에서 \*.bdf 파일을 생성하였으며, \*.bdf 파일은 MSC/Natran 을 넘겨져서 \*.pch 파일이 생성된다. 최종적으로 RecurDyn 에서 \*.pch 파일을 불러서(importing) 탄성체를 정의하게 된다. 유한요소모델의 전체 절점수는 37,316 개이며, 전체자유도는 223,914 이다.

Table 1 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)
Poisson's ratio	0.3
density	7.6E-6(kg/mm <sup>3</sup> )



Fig. 9 FEM model of spring

#### 3.3 절점모델

RecurDyn 은 탄성체를 모델링하는 데에 상대절점좌표를 사용하여 모델링하는 틀을 제공하고 있다. 본 연구에서는 RecurDyn 에서 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. 9 의 상부에 표시되어 있는 평평한 면을 RecurDyn 의 Patch set 을 사용하여 지그와 접촉되는 접촉면을 정의하였다. 스프링의 정적시험시에 권선간의 접촉은 관찰되지 않았으므로, 권선간의 접촉은 고려하지 않았다.

### 4. 스프링 모델의 성능비교

#### 4.1 정적시험과 시뮬레이션의 비교

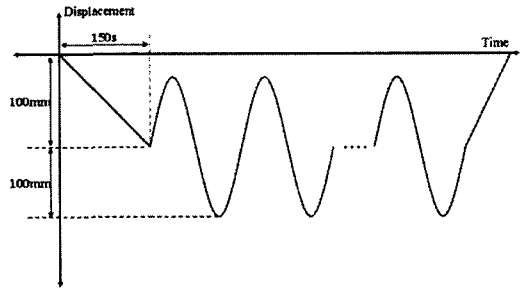
RecurDyn 을 이용하여 정적시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 시험과 비교하였다. Fig. 10 은 정적시험 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과는 세 가지 모델 모두 시험과 잘 일치하고 있음을 보여준다. Table 3 에는 세 가지 모델의 정확성과 효율성을 나타내었다. Table 3 에서 RMS 는 오차제곱평균(root mean square)를 의미하며, 식 (2)를 사용하여 계산하였다. Max error 는 최대 오차를 뜻한다. 정확성 면에서는 세 가지 모델 모두 오차범위 내에서 거의 비슷한 경향을 보여주고 있으나, 효율성 면에서는 선형 모델이 다른 모델에 비해 탁월한 성능을 보여주고 있다.

Table 2 First 10 natural frequencies for the spring

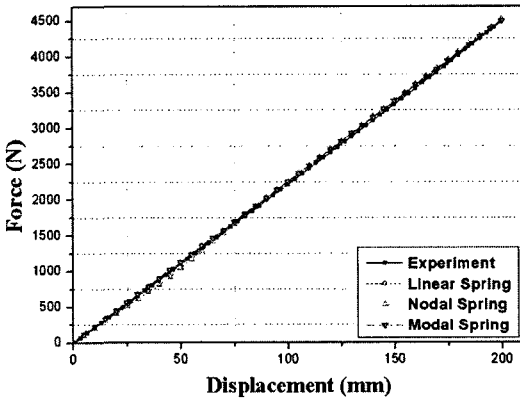
Mode no.	Mode type	f (Hz)
1	Symmetric(rotation about x-axis)	0.4552
2	Symmetric(rotation about z-axis)	0.45525
3	Axial	0.734
4	Torsional(rotation about y-axis)	0.832
5	Asymmetric(rotation about x-axis)	1.115
6	Asymmetric(rotation about z-axis)	1.116
7	Axial	1.463
8	Torsional(rotation about y-axis)	1.658
9	Symmetric(rotation about x-axis)	1.922
10	Symmetric(rotation about z-axis)	1.928

**Table 3** Comparison of numerical accuracy and efficiency

		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



**Fig. 11** Specification of sine excitation

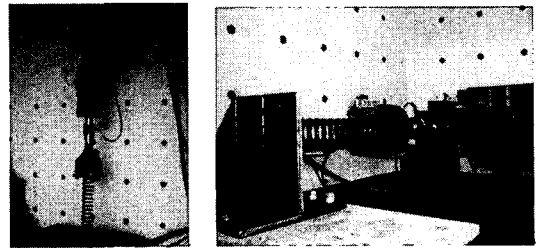


**Fig. 10** Comparison of static results

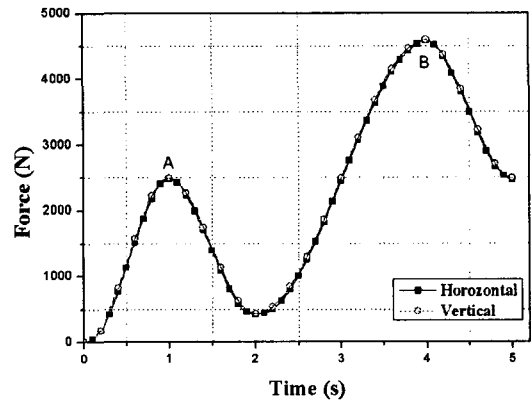
$$RMS\ error = \frac{\sum_{t=1}^T (F_{exp}(t) - F_{pre}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (F_{pre}(t))^2} \quad (2)$$

4.2 수평가진 시험과 시뮬레이션의 비교

스프링이 회로차단기내의 스프링조작기에 설치될 때, 스프링은 수평으로 누운 상태로 설치된다. 따라서, 스프링의 수평방향으로 눌혀져 있을 때의 특성이 조사될 필요가 있다. Fig. 11 은 사인가진 스패클을 보여주고 있다. 본 연구에서는 초기 압축량을 100mm, 압축시간을 150 초, 진폭은 100mm를 사용하였다. Fig. 12 는 스프링의 수평, 수직방향 가진 시험을 위한 시험장치를 보여주고 있으며 Fig. 13 은 결과를 보여주고 있다. 수직가진, 수평가진시험 결과 두 시험이 거의 비슷한 결과를 보여주었으며 A 점과 B 점에서 각각 1.4%, 0.4%의 차이를 보이고 있었다. Fig. 14 는 수평가진 시험과 세가지 스프링 모델의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 시험과 각 모델들의 A, B 점에서의 오차



**Fig. 12** A MTS machine for the vertical and horizontal dynamic test



**Fig. 13** Comparison of spring forces between horizontal and vertical excitation

오차를 살펴보면, 선형모델의 경우 2.2%, 0.6%, 절점모델의 경우 0.8%, 0.4%, 모드모델의 경우 3.6%, 0.8%의 차이를 보이고 있었다. 또한, RMS 오차는 선형모델이 1.2%, 절점모델이 0.8%, 모드모델이 1.6%를 보여서 근소한 차이이지만 절점모델이 가장 정확한 결과를 보여주었다.

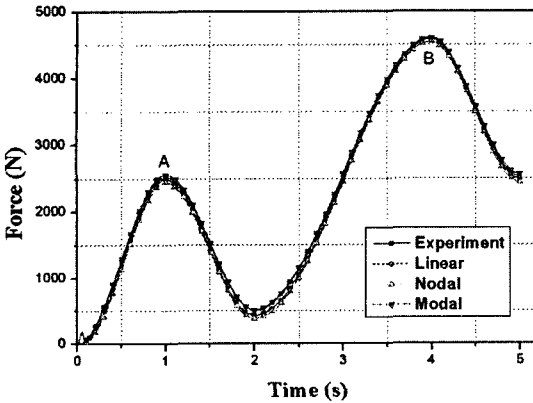


Fig. 14 Comparisons of spring forces under the horizontal excitation

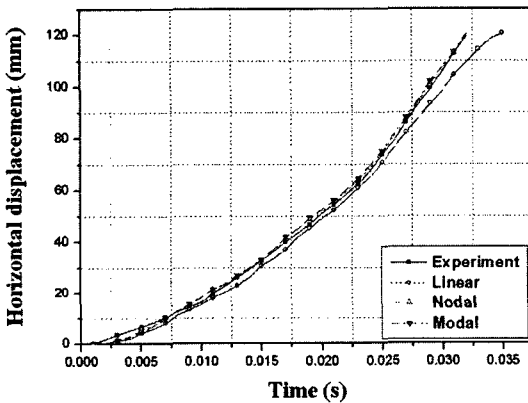


Fig. 15 Horizontal displacement at the end point with 150mm compression displacement according to time

#### 4.3 에너지방출 시험 및 시뮬레이션의 비교

스프링을 150mm 압축 후 방출시켰을 때의 시험과 세 종류의 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 Fig.15 에 도시하였다. 스프링의 끝단 점이 압축량을 완전히 방출하는데 걸린 시간은 실험의 경우, 32ms 였으며, 선형, 모드, 절점모델의 경우 각각 35ms, 32ms, 32ms 이었다. 시뮬레이션 결과, 선형모델은 효율성 면에서는 탁월하지만, 에너지방출 시뮬레이션에서는 다소 불리함을 알 수 있었다. 그러므로, 일반적인 스프링의 모델링일 경우는 스프링의 선형적인 특성을 표현할 수 있는 선형스프링 모델이 유리하며, 스프링의 관성 등의 영향을 고려하고 아주 짧은 시간에 스프링의 변형이 이루어지는 경우에는 스프링 권선간의 진동까지 표현할 수 있는 절점좌표 스프링 모델을 사용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정적 시험기를 이용하여 스프링의 정적 강성을 측정하였다. 스프링을 세 가지 모델, 즉 선형모델, 모드모델, 절점모델로 모델링을 하였으며, 정적 시험결과와 시뮬레이션을 비교하였다. 정적 시험의 경우, 세 가지 모델 모두 비슷한 경향을 보였으며, 해석에 소요되는 시간은 선형모델이 탁월하게 우수한 것으로 조사되었다. MTS 가진기를 이용하여 스프링의 수직 가진과 수평 가진 시험을 비교해 보았다. 절점모델이 수평 가진 시험결과와 가장 비슷한 결과를 보여 주었다. 회로차단기에 사용되는 스프링조작기에서 스프링은 수평방향으로 누운 상태로 장착이 되어 일정량을 압축 한 뒤 순간적으로 풀려서 차단이 이루어지게 된다. 따라서, 에너지방출 동작을 재현할 수 있는 간단한 기구를 제작하였으며, 시험과 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 선형스프링 모델은 정적 시험의 경우 정확성과 효율성 측면에서 제일 좋은 결과를 보여주었다.

(2) 스프링이 수평방향으로 누워있을 때를 시험과 시뮬레이션을 비교 했을 때, 절점모델이 가장 적은 오차를 보여주었다.

(3) 기구제작을 한 후, 에너지방출 시험을 실시하였으며, 시뮬레이션과 비교하였다. 절점좌표와 모드좌표를 이용한 모델의 도달시간이 시험과 똑같은 결과를 보여주어 우수한 성능을 보였다.

따라서, 스프링을 단순히 모델링 할 경우는 스프링의 선형적인 특성을 고려할 수 있고, 효율적인 측면을 고려해서 선형모델이 가장 낫다고 판단되며, 차단기와 같이 수평으로 누운 상태에서 고속으로 변형이 이루어질 경우는 절점좌표를 이용한 절점모델이 진동전달의 정확성 측면에서 낫다고 사료된다. 차단기 전체에 미치는 영향은 추후 연구결과에서 고려해 볼 만한 사항이다.

## 후 기

이 논문은 2006 년 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) Kim, S.H., 1993, "Dynamic Analysis of a Helical Spring Using an Extended Finite Difference-type Numerical Scheme," *Ph.D Thesis*, KAIST, Taejon, Korea.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Kim, S. H., Kim, W. K. and Park, Y. S., 1992, "Optimal Cam Profile Design and Experimental Verification on an OHC Type Cam-valve System," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 16, No. 11, pp. 2049~2058.
- (6) RecurDyn Theoretical Manual, 2006, Ver 6.0, FunctionBay Co.