

다물체동역학기법을 이용한 진공 회로차단기의 캠윤곽 최적설계

장진석* · 손정현*† · 유완석**

* 부경대학교 기계자동차공학과, ** 부산대학교 기계공학부

Optimization of the Cam Profile of a Vacuum Circuit Breaker by Using Multi-body Dynamics Techniques

Jin Seok Jang*, Jeong Hyun Sohn*† and Wan Suk Yoo**

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received December 1, 2010 ; Revised April 26, 2011 ; Accepted April 26, 2011)

Key Words : Cam Profile Optimization(캠윤곽최적화), Vacuum Circuit Breaker(진공회로차단기), Multibody Dynamics(다물체동역학)

초록: 진공회로차단기의 성능이 스프링조작기에 많이 좌우되기 때문에, 스프링조작기의 해석이 요구된다. 본 연구에서는 스프링의 특성시험을 먼저 수행한 후, 시험결과를 RecurDyn 프로그램을 이용한 컴퓨터시뮬레이션 스프링모델링에 이용하였다. 개발된 진공회로차단기의 다물체동역학 모델을 이용하여 차단기의 스템변위와 샤프트 회전각에 대한 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과를 시험과 비교 검증하였다. 검증된 다물체동역학 모델을 사용하여 차단속도를 증가시키기 위한 캠의 최적윤곽을 얻었다.

Abstract: Since the performance of a vacuum circuit breaker (VCB) mainly depends on the spring operating mechanism, an analysis of the spring operating mechanism is required in order to improve the design of a VCB. In this study, the static stiffness of the spring was determined by using a material testing machine, and the test results were used to model the spring through computer simulation. The multi-body dynamic model of the spring was established by using the RecurDyn program. The dynamic model was verified by comparing the results of stem displacements and rotating angles of the brake shaft obtained from the simulation and from the experiments. After verification of the dynamic model of VCB, the cam profile of the VCB was optimized through multi-body dynamics simulation in order to improve the performance of the closing mechanism.

1. 서 론

최근 Spring type 차단기 모델은 정격 및 용량에 따라 다양한 사양의 제품이 제작되고 있으며, 기술 개발을 통해 동일 용량에서 그 사이즈를 축소하고, 원가 절감을 위해 부품의 수를 줄이는 추세에 있다. 이에 대한 생산기술 측면은 상당부분 경쟁력이 확보되어 있으나 구동 부에 대한 메커니즘 기술력이 떨어지는 실정이다. N. Tsujiuchi⁽¹⁾는 VCB의 동적 특성에 대한 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, 안길영 등⁽²⁾은 스프링구동 링크와 캠 기

구를 가진 진공회로 차단기의 동적 거동 및 설계에 관한 연구를 수행하였고, A.P. Pisano 등⁽³⁾은 실험을 통해 고속 Cam-follower 시스템의 동적 응답에 대한 실험적인 평가에 대해 연구하였다. 기계 시스템의 새로운 메커니즘을 개발하기 위해서는 개발할 시스템에 대한 동역학적 모델링 방법을 연구하고 실험과의 상관관계를 통해 해석의 정확도를 향상시켜 제품 개발 비용을 감소하며 불확실한 시스템의 특성인자들을 도출하여 좋은 성능이 보장 될 수 있는 설계 기준을 확보해야 할 것이다.

본 연구에서는 스프링의 정적 변형 실험을 통해 각각의 강성을 구하여 해석 모델에 적용하였다. VCB의 차단 및 투입메커니즘의 특성을 파악하기 위해 각종 센서를 이용하여 계측하고 실험과 RecurDyn⁽⁴⁾을 이용한 동역학 시뮬레이션과의

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr

Correlation 수행을 통해 해석 모델링을 검증한다. 연구에서 비선형적 기계 요소에 대한 연구 및 모델링을 통해 실험과의 상관 관계를 분석하여 주요 에너지원인 스프링의 강성을 변경하였을 경우에 실험과의 시뮬레이션의 매칭을 통해 성능을 평가 및 다물체 동역학 해석 모델을 검증한다. 그리고 차단 성능 개선을 위하여 캠의 곡선을 수정하여 해석적으로 차단 메커니즘의 성능을 최적화 한다.

2. 진동회로차단기의 동역학모델링

Fig. 1 은 다물체 동역학 해석프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 진공회로차단기를 강체 모델링한 것을 나타낸 것이다. 캠 축에 Closing Spring 이 연결되어 있으며 기어박스는 투입메커니즘을 위한 투입 스프링이 탄성 에너지를 저장하도록 축을 회전 시키기 위해 존재하며 동역학 모델링에서 회전 조인트와 운동구속을 부여하여 모델링 하였다. Fig. 2 는 진공회로차단기 모델의 기구학적 연결도를 도시한 것이다. 28 개의 물체와 10 개의 회전조인트(revolute joint), 8 개의 유니버설 조인트(universal joint), 8 개의 구면조인트(spherical joint), 9 개의 병진 조인트(translational joint)로 연결되어 있으며, 전체적으로 Break shaft(Main Shaft)를 기준으로 2 개의 4 절기구(four-bar mechanism)와 1 개의 슬라이더-크랭크기구(sliding-crank mechanism)으로 구성된 구조이다. 투입스프링과 접촉스프링(contact spring), 차단에 사용하는 트립 스프링(trip spring)이 연결되어 있다. 다물체동역학 모델링을 위해 3 개의 스프링에 대해 만능재료시험기 UH-F100A, Shimadzu Co. 를 이용하여 강성값을 측정하였다. Fig. 3 에 사용한 만능재료 시험기를 나타내었다.

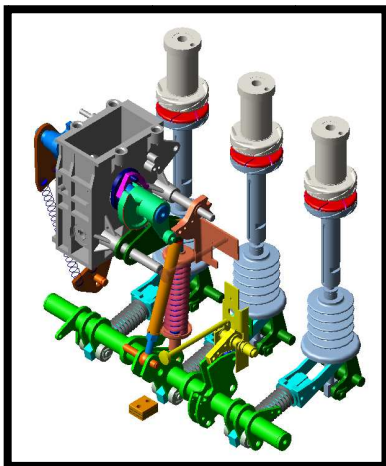


Fig. 1 Multibody model of vacuum circuit breaker

3. 시험과 시뮬레이션의 비교

3.1 진공회로차단기의 거동시험

전체적으로 실험 측정은 DAQ 하드웨어를 이용한 아날로그 입력이나 아날로그 출력, 디지털 입출력과 카운터 및 타이머를 측정하는 DAQ system 으로 구성되어 있다. 구성 단계로는 센서, Signal conditioning, DAQ hardware Converter, 및 LabVIEW 로 되어있으며 가속도 센서, 레이저 변위센서, 각도센서를 부착하여 시험데이터 획득에 이용하였다. 설치 위치를 나타낸 Fig. 4 에서 1~6 은 가속도 센

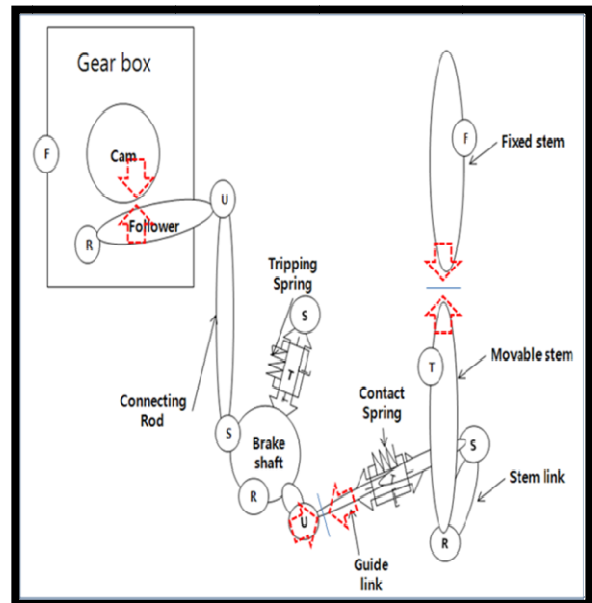


Fig. 2 Kinematic diagram of multibody model



Fig. 3 Testing machine(UH-F100A, Shimadzu Co.)

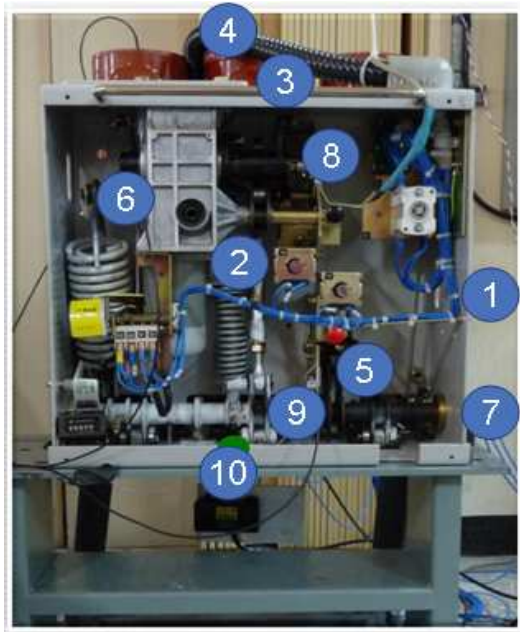


Fig. 4 Installation position of sensors

서를 부착한 위치이며, 충격에 따른 진동특성을 측정하였다. 7~8 은 각도 센서를 나타내며, 메인샤프트와 캠의 회전각도를 측정하는데 이용된다. 9 는 스트레인 게이지 위치를 나타내며 구동 샤프트의 변형량을 측정하는데 이용된다. 10 은 후면 아래의 스템변위를 계측하기 위한 레이저 변위 센서의 부착위치이다.

3.2 시험과의 비교

전체 메커니즘의 정량적인 Correlation 범위 및 분석 기준은 각각 Opening 및 Closing 이 시작되는 시점부터 50% 작동상태에서의 Main Shaft 의 각속도 와 Movable Stem 의 속도에 대한 결과를 비교를 통해 정량적으로 검증한다. 데이터의 획득 방법은 Opening 및 Closing 메커니즘 의 시작 시점과 Overshoot 가 나타나는 시점의 중간지점에서 계측한 데이터의 일부를 최소자승법을 통해 Main shaft 의 각속도 및 스템의 속도를 구하여 결과를 비교한 결과 5% 미만으로 일치 하였다. Fig. 5~8 는 각각 Opening 메커니즘과 Closing 메커니즘의 실험과 시뮬레이션의 매칭 결과이며 다물체 동역학 해석 모델을 검증하였다. Fig. 5 는 차단 메커니즘에서 스템의 변위응답을 나타내며 Fig. 6 은 주 에너지 전달 요소인 메인샤프트의 각변위 응답이다. Fig. 7 와 Fig. 8 는 각각 투입메커니즘에서의 스템의 변위응답과 메인샤프트의 각변위 응답이다. Table 1 에 Opening 메커니즘 구동시의 오차를,

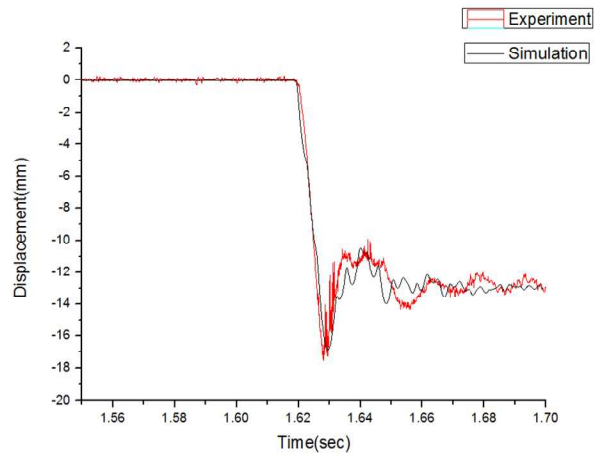


Fig. 5 Comparison of VI displacement in opening mechanism

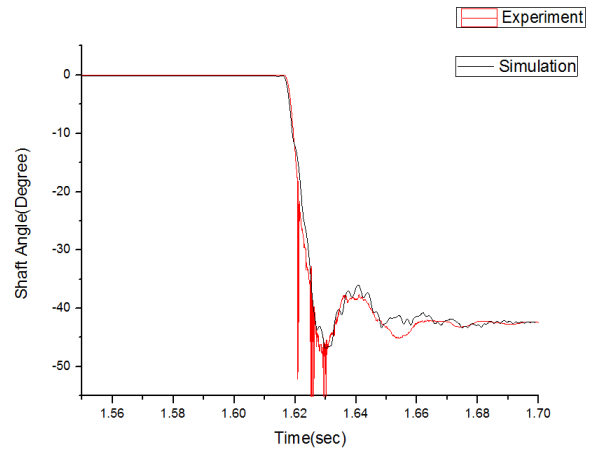


Fig. 6 Comparison of shaft angle in opening mechanism

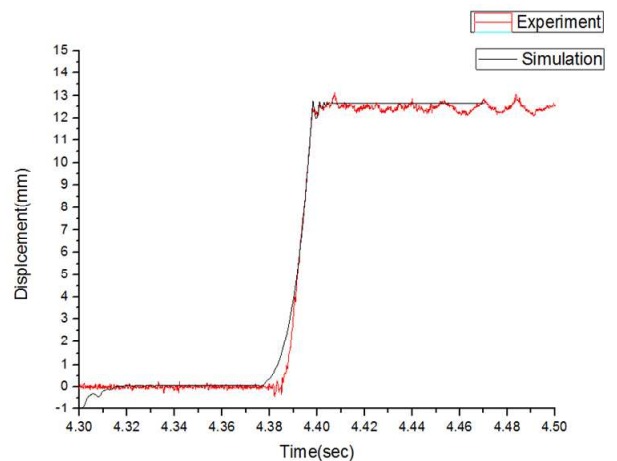


Fig. 7 Comparison of shaft VI displacement in closing mechanism

Table 2 에 Closing 메커니즘 구동시의 오차를 각각 나타내었다. 전체적으로 5 %미만으로 시험과 잘 일치하였다.

Table 1 Error of opening mechanism correlation

Item	Shaft angle(%)	Stem displacement(%)
Velocity	3.57	4.55
Overshoot	4.3	3.75

Table 2 Error of closing mechanism correlation

Item	Shaft angle	Stem displacement	Cam Angle
Velocity	4.1	4.2	4.2
Overshoot	4.16	X	X

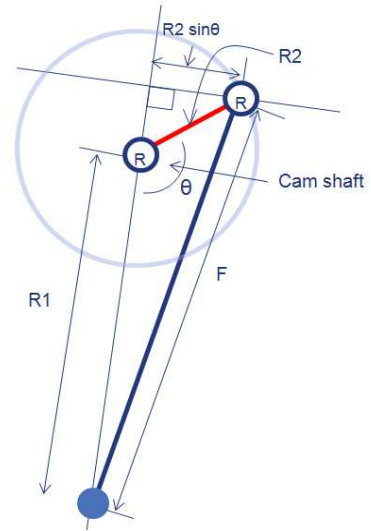


Fig. 9 Closing spring

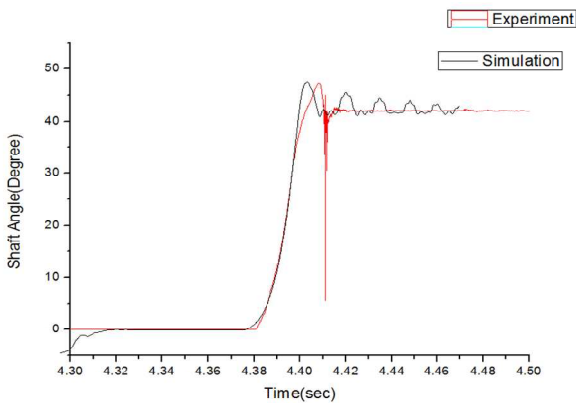


Fig. 8 Comparison of shaft angle in closing mechanism

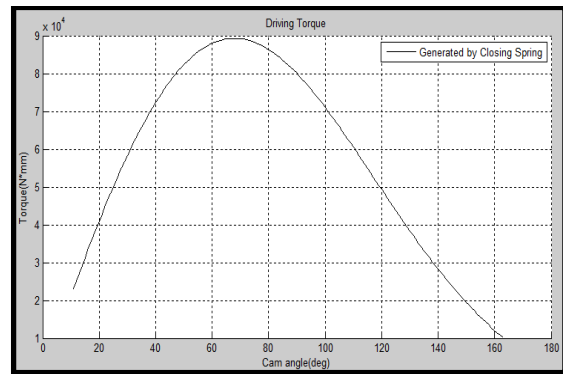


Fig. 10 Torque generated by Closing shaft

4. 캠윤곽 최적설계

4.1 구동력 분석

캠 샤프트의 압 끝부분과 하우징에 인장된 상태로 연결된 투입 스프링력에 의하여 캠구동축에 발생하는 토크는 일정하게 나타나지 않는다. Fig. 9 에 투입 스프링에 의한 모멘트 형성을 나타내었다. 발생하는 토크는 아래 식 (1)과 같다. 스프링이 인장된 상태에서부터 캠이 회전함에 따라 축에 작용하는 토크는 Fig. 10 에 나타내었다. 일반적으로 등속캠 회전 등에 대한 설계방법이 알려져 있지만 구동 토크가 회전에 따라서 다르게 나타나는 비등속 캠으로 접촉요소뿐만 아니라 연결된 다수의 링크의 동적 거동이 복합적으로 고려된 캠의 윤곽설계가 요구됨을 알 수 있다.

$$T = L \times K_{CS} \times R2 \sin\theta \quad (1)$$

4.2 설계변수 및 목적함수

본 연구에서는 3 장에서 검증된 다물체동역학 모델을 이용하여 Closing 메커니즘에 포함된 캠윤곽에 대한 최적설계를 수행하였다. 캠 윤곽에 대해 직교좌표계를 설정하게 되면 x, y 두 변수가 고려되어야 한다. 변수를 줄일 방법으로 r, θ 좌표를 이용하여 각도를 일정하게 두어 반경인 r 을 설계 변수를 두어 각 연결 지점을 Cubic spline 으로 보간하여 프로파일(profile)을 형성하는 방법을 적용하였다. 이를 통해 적은 변수로도 프로파일을 수정할 수 있도록 하였다. 캠의 형상을 Fig. 11 에 나타내었다. 기존의 캠의 기초원 반지름은 28 mm 이며 152 deg 를 회전하여 59.5 mm 까지 일정하게 상승하도록 설계 되어 있다. 각 중간지점의 반지름 방향의 길이를 설계변수로 두었다. 설계점은 5 점이 사용되었고, 설계변수는 식 (2)와 같다. 각도

는 25.33 도 간격으로 균등하게 분할하였고 반경 위치만 설계변수로 두었다. 목적함수는 차단 스위치가 눌러지는 순간부터 스템(stem)이 접점에 붙는 순간까지의 전체 메커니즘 구동시간으로 두었고 식 (3)과 같다.

$$Q = [DP_r1, DP_r2, DP_r3, DP_r4, DP_r5] \quad (2)$$

$$\text{Objective Func} = \text{Min} [T_contact - T_break \text{ start}] \quad (3)$$

제약 조건으로는 투입 메커니즘이 구동된 후 래치(latch)에 고정이 되어 유지를 해야 하며 캠이 메커니즘 종료 후 완전히 회전해야 한다. 완전히 회전하지 못한 상태에서 재투입 대기상태로 만들기 위하여 모터로 강제로 캠 샤프트를 회전하게 되면 모터에 큰 부하가 걸리게 된다.

Fig. 12 는 민감도 해석을 수행한 결과이다. 각 지점의 민감도 해석을 수행한 결과 초기 투입지점의 상승률에 문제가 있음을 알 수 있다. 민감도 해석을 수행한 결과를 바탕으로 설계변수의 범위를 각각 조정하여 RecurDyn 의 AutoDesign 을 통하여 최적화를 수행하였다.

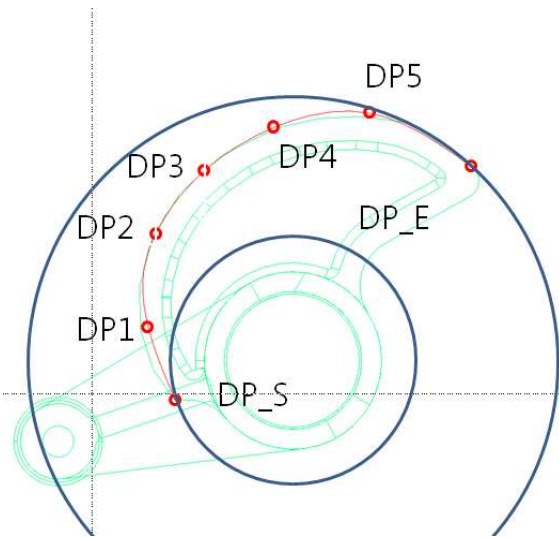


Fig. 11 Cam profile and Design point

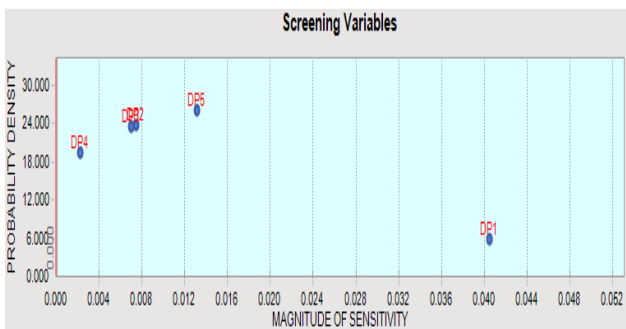


Fig. 12 Results of sensitivity analysis

4.3 최적설계 결과

Fig. 13 은 스템의 변위 응답이며 심볼라인은 기존의 캠 형상에 의한 응답이며 실선은 최적화된 형상의 캠을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 최적화된 형상의 캠에서 스템변위의 투입 속도는 향상되었음을 알 수 있다. Table 3 에 스템 작동 시간 비교를 나타내었다. 투입시간은 초기 0.107 초에 투입메커니즘이 시작하여 0.127 초에 접점에 닿는다. 총 0.02 초 동안 구동이 된다. 개선된 캠 형상으로 얻은 투입 속도는 0.107 초에 시작하여 0.1236 초에 접점에 닿아 0.0166 초 동안 구동된다. 이에 따라 전체 투입속도는 17 % 개선됨을 알 수 있다. 이는 곧 17 % 낮은 투입 스프링의 강성을 이용하더라도 본래의 성능을 낼 수 있음을 의미한다. Fig. 14 은 에너지 전달요소인 메인샤프트의 각 변위 응답을 나타낸다. 스템이 닿는 지점부터 접압 스프링이 압축되면서 속도가 감소하며 래치에 걸려 압축된 상태의 각을 유지함을 알 수 있다. 메인샤프트의 회전속도 또한 향상되었다.

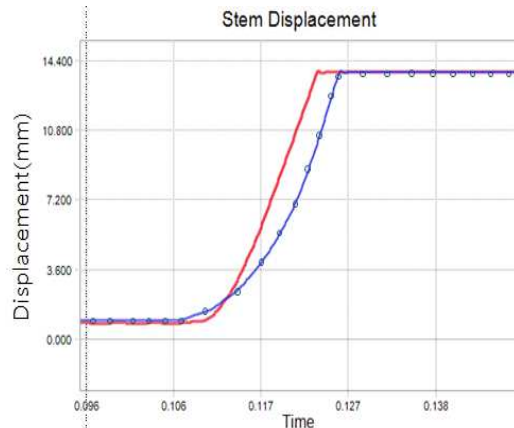


Fig. 13 Comparison of VI displacement in opening mechanism

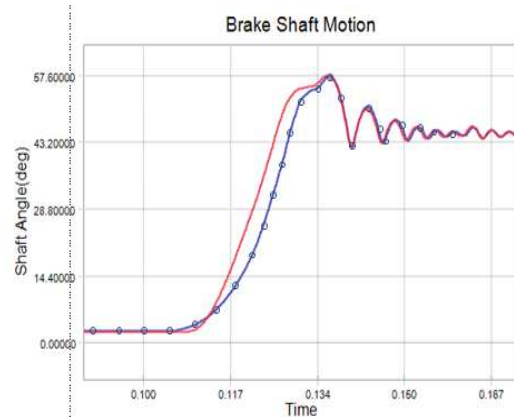


Fig. 14 Comparison of VI displacement in opening mechanism

Table 3 Comparison of stem operating time

	Stem Start time(s)	Stem End time(s)
Original	0.107	0.127
Optimized	0.107	0.1236

5. 결 론

본 연구에서는 진공회로 차단기의 재투입속도 개선을 위해 진공회로차단기의 다물체동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 동역학 모델링 검증을 위해 거동특성 시험을 수행하였다. 다물체동역학 모델링을 위해 투입스프링, 압축스프링, 트립 스프링의 정적 특성시험을 수행하여 스프링의 강성값을 추출하였다. 다물체동역학 모델은 거동특성 시험과 5%내의 오차로 검증되었다. 진공회로차단기의 캠 윤곽 최적설계를 위해 작동 범위 내에 반경 방향의 거리 변수 5개의 설계점을 두었고, Cubic spline 보간법을 이용하여 해석하였으며, 생성된 캠에 따른 차단속도 비교를 통해 캠윤곽의 최적설계를 수행하였다. 최적화를 통해 투입 메커니즘의

구동 시간이 20 ms 에서 16.6 ms 로 향상되었다.

후 기

본 연구는 현대중공업(주)의 2009 년도 산학협동 연구과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Tsujiuchi, N., 1995, "Optimum Design for Dynamic Characteristic of VCB," Asua-Pacific Vib, Conf., pp.810~815.
- (2) Ahn, K. Y. and Jeong, K. Y., 2004, "Optimization of The Spring Design Parameters of a Circuit Breaker for Satisfying Specified Dynamic Characteristics," *Journal of the KSPE*, Vol.21, No.3, pp.132~138.
- (3) Pisano, A.P. and Freudenstein, F., 1983, "An Experimental Analytical Investigation of the Dynamic Response of High-Speed Cam-Follower System Part:2 A Combined, Lumped/Distributed Parameter Dynamic Model," *Transaction, ASME-Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design*, Vol. 105, pp. 699~704.
- (4) FunctionBay, 2010, "RecurDyn V7R3 Advanced Training guide"