

캠 윤곽 최적설계를 통한 차단기 래칭 성능 향상

이재주* · 장진석* · 박현규* · 유완석*† · 김현우** · 배병태**

* 부산대학교 기계공학부, ** 효성중공업

Optimization of a Cam Profile in a Circuit Breaker to Improve Latching Performance

Jae Ju Lee*, Jin Seok Jang*, Hyun Gyu Park*, Wan Suk Yoo*†, Hyun Woo Kim** and Byung Tae Bae**

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

** Hyosung Power & Industrial System PG.

(Received August 20, 2015 ; Revised November 17, 2015 ; Accepted November 18, 2015)

Key Words: Cam Profile Optimization(캠 윤곽 최적설계), Circuit Breaker(차단기), Design Sensitivity Analysis(민감도 분석), Multi-body Dynamics(다물체동역학)

초록: 차단기 메커니즘의 안전성은 클로징 메커니즘 작동 시 접점 이후의 속도 감소를 통한 오픈 샤프트가 래칭에 걸리는 래칭(latching) 구간에서의 유지 시간 개선을 통해 확보된다. 이는 오픈 래치가 복귀할 시간을 확보하여 재 차단되는 현상을 줄이기 때문이다. 본 연구에서는 캠 윤곽 최적화를 통해 기존의 구동 성능을 만족하고 래칭 구간에 대한 메커니즘의 안전성을 확보하고자 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 구간에서의 유지 시간을 개선하였다. ADAMS 를 이용한 차단기 다물체동역학 모델을 개발하였으며 시험 결과와 비교하여 검증하고 최적설계 프로그램인 PIANO 를 사용하여 캠 윤곽의 최적설계를 수행하였다. 캠 윤곽의 최적설계는 캠의 반경 방향으로 설계점을 선정하였으며 설계구간별 민감도 분석을 수행하였다. 최적화 결과 래칭 구간에서의 유지 시간을 개선하였다.

Abstract: Higher circuit breaker safety standards can be obtained by increasing the sustaining time of the latching section. This time increase is achieved through velocity reduction after contacting when the closing mechanism operates. The potential for the re-closing phenomenon to occur is also reduced by obtaining time to return open latch. In this study, the sustaining time for the latching section was increased through cam profile optimization based on the displacement response of the moving parts. In addition, the existing performance velocity was also satisfied. A multibody dynamics model of the circuit breaker was developed using ADAMS. To validate the model, simulation results were compared to experiment results. Then, cam profile optimization was carried out using an optimal design program PIANO. Design variables selected included the radial direction of the cam. Design sensitivity analysis was carried out by design section as well. As a result of optimization, the sustaining time for the latching section was increased.

1. 서론

차단기는 전기회로 내 과전류가 발생하거나 시스템 결함의 발생으로 인한 사고를 예방하기 위해 전류의 흐름을 끊는 장치이다. 차단기의 종류에는

여러 가지가 있지만 스프링 힘을 구동동력으로 하는 스프링 타입의 조작기가 주로 이용된다. 이는 누유에 의한 구동에너지의 감소 및 온도에 의한 조작력의 변동이 없으며, 구동에너지를 스프링에 결합된 기계부품으로 직접 전달하는 비교적 간단한 구조로 이루어져 있기 때문이다. 또한, 30~40ms 의 짧은 시간에 큰 부하를 가진 중동절(follower)을 높은 가속도로써 움직이게 하는 장점

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 가지고 있다.^(1,2)

Fig. 1은 스프링 조작기를 가진 차단기의 모습이다. 스프링 조작기를 가진 차단기는 인터럽터(interrupter)부와 이를 구동시킬 수 있는 구동 메커니즘(mechanism)부로 구성된다. 인터럽터부는 접점의 개폐(closing/opening)시에 발생하는 아크를 소호시키는 역할을 하며, 구동 메커니즘부는 높은 가속과 큰 하중의 운동이 진행되는 인터럽터의 가동부(moving part)에서 요구되는 동특성을 구현할 수 있도록 저장된 에너지를 전달하는 역할을 한다. 구동 메커니즘부는 클로즈 및 오픈 스프링(close and open spring), 캠(cam), 래치(latch) 등으로 구성되어 있으며 모양과 위치에 따라 그 특성이 달라지기 때문에 최적의 설계가 요구된다.

구동 메커니즘의 경우, 솔레노이드의 모션에 의해 래치들의 접촉이 떨어지면서 클로즈 및 오픈 스프링의 저장된 탄성 에너지가 방출(release)되어 구동력을 발생시킨다. 이 힘에 의해서 클로즈 샤프트(close shaft)에 위치한 캠이 회전하게 된다. 캠이 회전하면서 종동질의 움직임을 발생시키므로, 캠의 형상 설계를 통해 차단 시간 개선 및 구동 메커니즘의 신뢰성을 확보하도록 종동질의 운동을 제어할 수 있다.^(3,4) 메커니즘의 안전성은 차단 메커니즘 작동 시 접점 이후의 속도 감소를 통한 오픈 샤프트(open shaft)가 래치에 걸리는 래칭(latching) 구간에서의 유지 시간이 증가되면 래치가 걸리기 위해 필요한 시간을 충분히 확보하게 된다. 이로서 접점 이후 래칭이 되지 않고 재차단되는 현상을 줄여 클로징 메커니즘(closing mechanism)의 안전성을 확보할 수 있다.

Ahn^(5,6)은 운동 방정식을 이용한 비등속 캠의 최적 설계를 수행하였고, Yoo⁽⁷⁾는 스프링 조작기를 가진 초고압 차단기의 동적 분석 및 설계를 연구하였다. 이전 연구에서는, 캠 윤곽(profile)의 최적화를 통한 차단기의 구동 시간 개선에만 초점을 두었다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 차단기 모델의 동특성을 파악하고자 ADAMS⁽⁹⁾를 이용한 다물체 동역학 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 시험 결과와 비교하여 검증하고 캠 윤곽의 최적설계를 수행하였다. 최적화 과정에 최적 설계 프로그램인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)⁽¹⁰⁾를 활용하였으며, 캠 윤곽 최적화를 통해 기존의 구동 성능을 항상 만족하고 오픈 샤프트가 래치에 걸리는 래칭 구간에 대한 메커니즘의 안전성을 확보하고자 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 구간에서의 유지 시간을 개선하고자 한다.

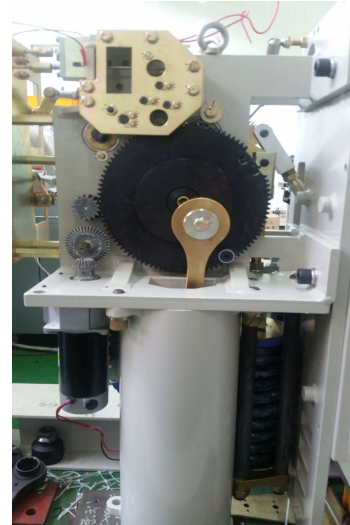


Fig. 1 Circuit breaker with spring operating mechanism

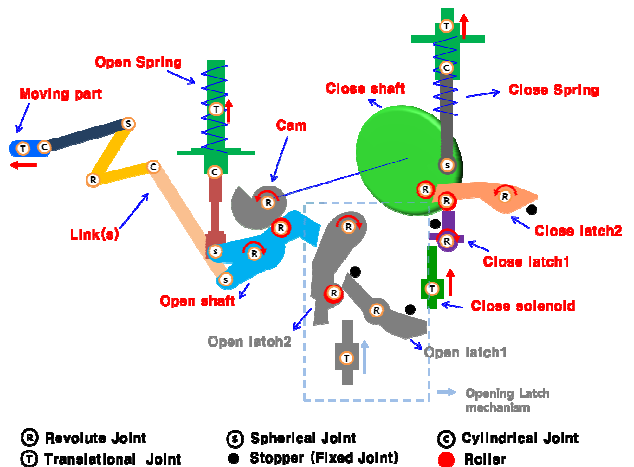


Fig. 2 Mechanism of a circuit breaker model

2장에서 차단기의 다물체 동역학 모델링 과정을 설명하였고, 3장에서 개발된 모델의 신뢰도 검증을 위한 비교 검증 결과를 나타내었다. 캠 설계 과정에 대한 내용은 4장에 정리하였으며 민감도 분석결과와 최적설계 결과에 대하여 나타내었다. 5장은 결론의 기대효과에 대해 기술하였다.

2. 차단기의 동역학모델링

2.1 차단기의 다물체 동역학 모델링

상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 모델링을 하였다. Fig. 2는 차단기 모델의 메커니즘이다. 메커니즘의 구성은 오픈 및 클로즈 솔레노이드(solenoid) 2개, 래치 4개, 롤러(roller) 3개, 메인 기어 롤러(main gear roller) 1개, 스토퍼(stopper) 4개, 가동부 1개, 클로즈 샤프트 1개 및 클로즈 샤프트 축에 연결된 링크(link) 2개,

Table 1 Degrees of freedom of a circuit breaker

Classification		DOF
Bodies	25 * 6	150
Revolute joint(s)	11 * -5	-55
Spherical joint(s)	4 * -3	-12
Cylindrical joint(s)	4 * -4	-16
Translational joint(s)	5 * -5	-25
Fixed joint(s)	4 * -6	-24
Motion	2 * -1	-2
Total DOF		16

오픈 샤프트 1 개 및 오픈 샤프트에 연결된 링크 5 개와 오픈 스프링에서 작용하는 대시포트 (dashpot) 1 개, 총 25 개의 물체로 구성되어 있다. 메커니즘 전체적인 구성은 솔레노이드에서 발생하는 병진 자유도 2 개, 래칭에서 발생하는 회전 자유도 4 개, 롤러에서 발생하는 회전 자유도 4 개, 모션에서 발생하는 운동 자유도 2 개, 오픈 샤프트를 기준으로 총 2 개의 슬라이더-크랭크기구(slidebar-crank mechanism)와 1 개의 4 절기구(4-bar mechanism)로 구성된 구조이며, 총 16 자유도(DOF, degrees of freedom)를 가진다. Table 1 에 차단기의 자유도를 나타내었다.

2.2 차단기의 클로징 메커니즘

차단기에서는 전기회로 내의 전류의 차단이 발생하는 클로징 메커니즘이 중요하다. Fig. 3 은 클로징 메커니즘의 구동 순서를 나타내고 있는데, 작동 순서는 다음과 같다.

Step1) 전기회로 내에 과전류 발생 시, 솔레노이드가 구동된다.

Step2) 솔레노이드가 래칭 1 을 밀고, 차례로 래칭 2 가 반시계 방향으로 회전을 하게 된다.

Step3) 래칭 1 과 2 의 접촉(contact)이 떨어지면서 클로즈 스프링이 초기 압축되어 있던 힘에 의해 인장된다.

Step4) 클로즈 샤프트 축에 위치한 캠이 스프링 힘에 의해 반시계 방향으로 회전한다.

Step5) 캠과 오픈 샤프트와의 접촉이 떨어지면서 차례로 오픈 샤프트가 래칭 2 에 걸리게 되며, 링크(link)들과 가동부가 차례로 움직이게 된다.

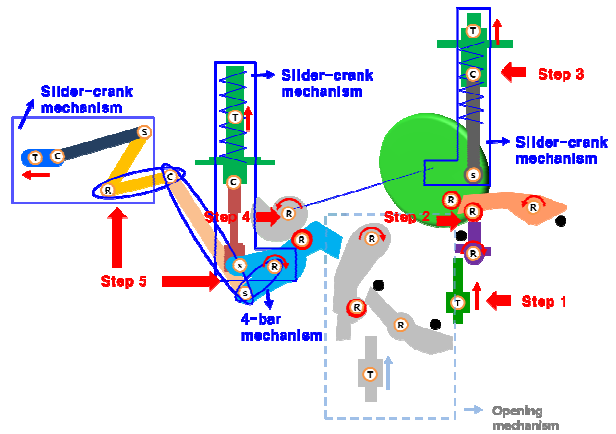


Fig. 3 Operating sequence of a circuit breaker

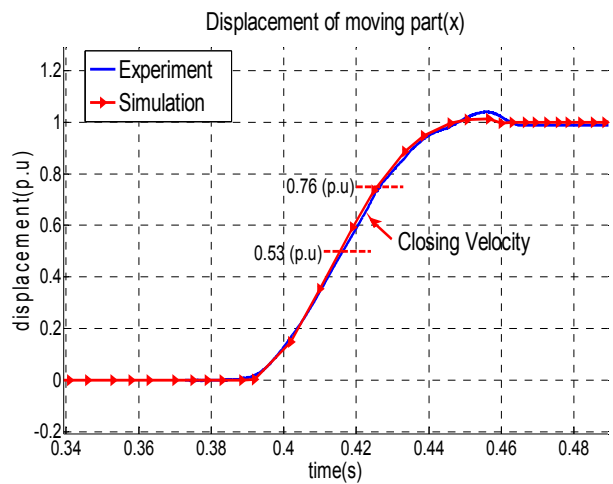


Fig. 4 Interrupter displacement response between experiment and simulation

3. 시험과 시뮬레이션의 비교

ADAMS 를 사용하여 개발된 다물체 동역학 모델을 검증하기 위하여 차단기 클로징 메커니즘 작동 시의 가동부의 변위가 비교되었으며, 비교 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 초기 상승 구간의 변위를 기준으로 정규화를 하였으며, 이 구간을 1(p.u : percent unit)으로 두었다. 차단기 메커니즘의 성능상 구동 시의 속력이 일정 속도 이상이 되어야 한다. 이에, 클로징 메커니즘 작동 시 가동부의 변위가 0.53~0.76(p.u) 되는 구간에서의 속도가 비교되었다. 이 구간은 오픈 샤프트가 래칭에 걸리는 래칭이 발생하기 전으로 메커니즘의 구동 성능을 반영할 수 있는 구간이다. 이때, 실험에서 최대 스트로크 (stroke)가 더 높게 나오는 것은 인터럽터 (interrupter) 접점이 이루어짐에 따라 주위의 전자

Table 2 Comparison of closing velocity between experiment and simulation

	Experiment	Simulation	Error
Closing velocity	24.3 (p.u/s)	23.9 (p.u/s)	1.6 (%)

기력이 센서에 같이 측정되었기 때문이다. Table 2에 시험과 시뮬레이션상의 클로징 속도 차이가 수치적으로 비교하였는데, 오차 2%미만으로 시험과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

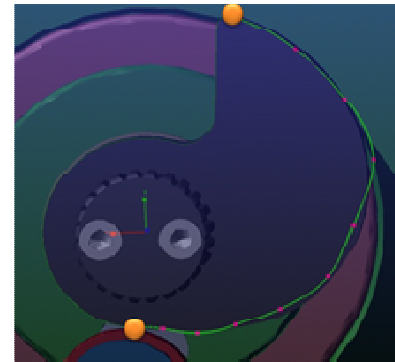
4. 캠 윤곽 최적설계 및 결과

4.1 캠 윤곽의 설계 변수 선정

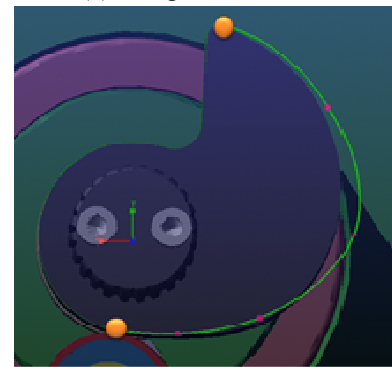
3장에서 검증된 다물체 동역학 모델을 이용하여 클로징 메커니즘에 사용되는 캠의 최적설계를 진행하였다. 설계 변수 선정은 변수를 줄이고자 캠의 윤곽에 대해 각도를 일정하게 두고 반경을 설계 변수로 두었다.⁽⁸⁾ 이를 통해 적은 변수로도 윤곽을 수정할 수 있도록 하였다. 캠의 윤곽 형성은 ADAMS의 B-spline 보간법(interpolation)을 사용하였다.

기존의 캠의 기초원 반지름은 38mm이며, 165deg를 회전하여 92.5mm까지 일정하게 상승하도록 설계되어 있다. 가동부의 최대 스트로크 구간 및 변위 응답의 특성을 반영하는 캠의 처음과 끝점을 제외한 중간 구간에 대하여 설계 변수로 두었다. 초기 설계점은 설계 변수 11(DV_1 ~ DV_11)개 중 캠의 요구성능을 나타내는 캠의 처음과 끝점을 제외한 총 9점을 사용하였던 바, Fig. 5(a)와 같은 변곡 구간이 발생되었다. 이는 B-spline 보간법의 특성상 3차 다항식을 사용하여 3차원 공간상의 여러 개의 점을 지나는 근사 곡선을 유도하기 때문이다. 따라서, 이를 보완하고자 11 점에서 중간에 위치한 변수를 삭제하고 Fig. 5(b)와 같이 4 점의 반경만 설계변수(DV_3, DV_5, DV_7, DV_9)로 선정하였다. 설계변수의 개수 선정은 개수를 최소화하고 설계영역별 응답을 분석하기 위해 4 개를 선정하였으며 3 개를 선정할 경우 초기 및 최대 상승구간에 대해 변수가 생성하는 캠 곡면의 구간이 넓어지므로 응답을 조절하기 어려우므로 4 개를 선정하였다. 따라서, 설계점의 개수가 적어지면서 변곡 구간이 발생하지 않았으며 설계구간별 특성 분석이 더 용이해졌다.

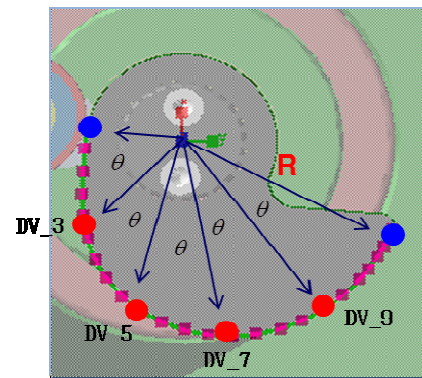
또한, 구간별 민감도 해석을 수행하여 메커니즘에 대한 각각의 응답에 대한 관계를 분석할 수 있



(a) Design variables : 9



(b) Design variables : 4

Fig. 5 Cam profile according to number of design variables**Fig. 6** Design variables used for cam profile optimization

었다. Fig. 6은 최적화에 사용된 캠의 설계 변수를 나타내었으며, 설계변수 사이의 구간은 스플라인 함수로 보간하였다.

4.2 캠 윤곽의 최적설계

본 연구에서는 캠 윤곽의 최적설계를 수행하기 위해 최적설계 프로그램인 PIANO를 사용하였다. 최적설계를 수행하기에 앞서 목적함수 및 제약조건에 가장 큰 영향을 미치는 구간을 분석하기 위해 민감도 해석(design sensitivity analysis)을 하였으

며, 해석 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 제약 조건인 클로징 메커니즘 작동 시 가동부의 변위가 0.53~0.76(p.u) 지점에서의 클로징의 속도가 기존 메커니즘보다 향상되어야 한다는 조건에 큰 영향을 주는 구간은 DV_3 과 DV_5 번 구간이며, 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 구간에서 최대 스트로크 상태로 유지하는데 영향이 큰 구간은 DV_9 임을 알 수 있다.

목적 함수인 오픈 샤프트가 래치에 걸리는 래칭 구간에서의 유지 시간을 최대화 하는 것에는 DV_7 과 DV_9 의 영향이 큰 것을 확인할 수 있다. 민감도 해석을 수행한 결과를 바탕으로 설계변수의 범위를 각각 조정하여 캠 윤곽의 최적화가 진행되었다.

최적화는 ADAMS 의 Batch Run 을 활용하여 EXCEL 과 ADAMS 순으로 전후 처리기와 Solver 를 연동하여 진행되었으며, 최적화 과정을 Fig. 8 에 나타내었다. 최적화 과정에서 EXCEL 은 캠 윤곽에 대한 X, Y 좌표 및 반경 R 에 대한 설계변수를 지정한다. Mapping Wizard 에서는 ADAMS 에서

물체의 좌표 및 정보를 나타내는 *.adm file 을 Input 으로 설정하였고, 측정하고자 하는 가동부의 변위를 Solver Setting 을 통해 *.request file 로 저장하여 Output 으로 설정하였다. *.acf file 과 *.request file 의 경로를 저장하여 Batch file 을 생성하였다. MATLAB 을 통해 목적함수 및 제약조건을 구할 수 있도록 하였다.

목적함수는 오픈 샤프트가 래치에 걸리는 래칭 구간에 대한 구동 메커니즘의 안전성을 확보하고자 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 구간에서의 유지 시간을 개선하도록 정하였으며, 식 (1)과 같다. 제약 조건으로는 클로징 메커니즘 작동 시 가동부의 변위가 0.53~0.76(p.u) 인 구간의 클로징 속도가 기존 메커니즘보다 향상되어야 한다. 또한, 오픈 샤프트가 래치에 걸릴 때의 가동부의 변위는 기존의 변위 응답 특성을 유지하도록 하였으며, 식 (2)와 같다. Fig. 9 은 최적화에 사용되는 목적함수 및 제약조건을 MATLAB⁽¹¹⁾을 사용하여 나타낸 것이다. 유지시간은 1(p.u) 이상을 유지하는 시간을 의미하며 유지시간이 길수록 래칭되는 시간을 확보하여 래칭 성능을 향상시킬 수 있다.

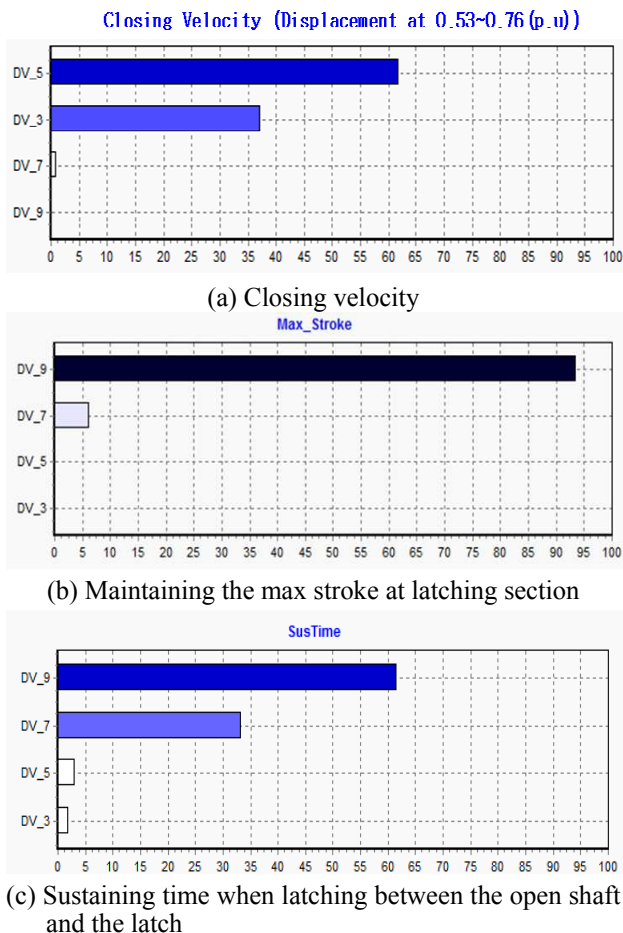


Fig. 7 DOE design sensitivity analysis results

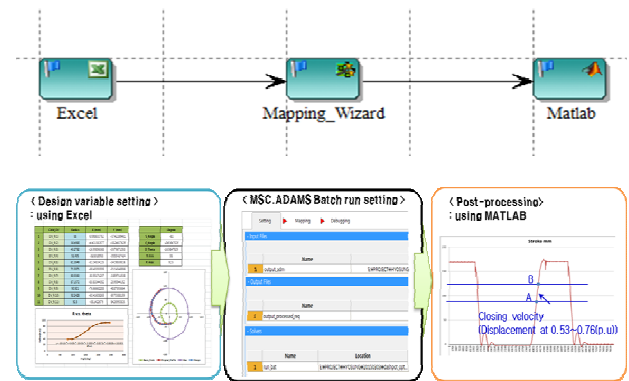


Fig. 8 Optimization process

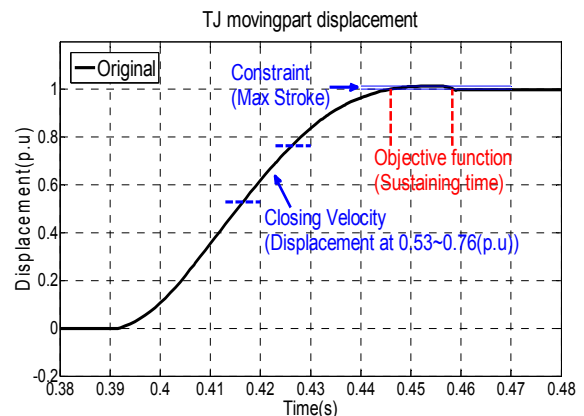


Fig. 9 Objective function and constraints

Table 3 Interrupter displacement responses according to original and optimum cam profile

	Sustaining time (ms)	Closing velocity (p.u/s)	Max Stroke (p.u)
Original	13	24.2	1.01
Optimum	20	27.1	1.01

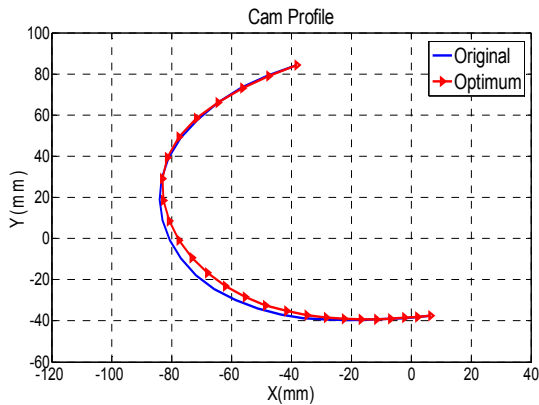


Fig. 10 Profiles in original cam and optimized cam

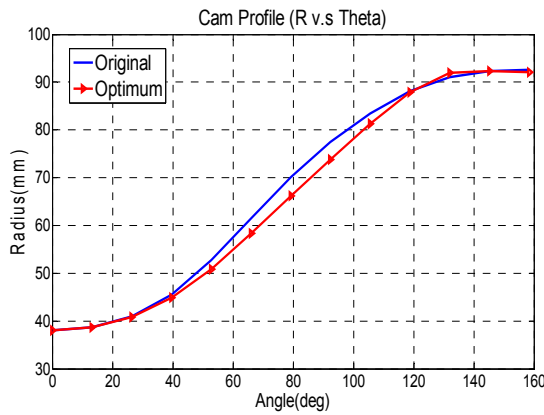


Fig. 11 Radius of original cam and optimized cam

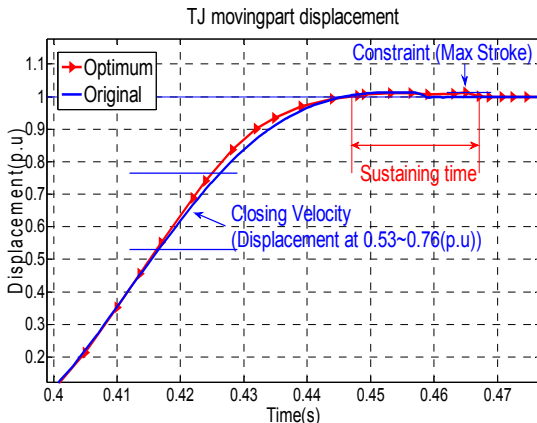


Fig. 12 Comparison in interrupter displacement response between original cam and optimized cam

$$\text{Objective Function} = \text{Max} [\text{Sustaining time}] \quad (1)$$

$$\text{Constrains} = \quad (2)$$

$$\text{Moving part displacement when latching} > 1(\text{p.u})$$

$$\text{Closing velocity} > 24.2(\text{p.u/s})$$

최적설계 알고리즘은 점진적 이차 반응 표면 방법(Progressive Quadratic Response Surface Method, PQRSM)⁽¹²⁾을 사용하였다. 점진적 이차 반응 표면 방법은 목적함수와 구속 조건을 설계 공간 내에서 2 차 함수로 근사화하고 신뢰영역 근사모델 관리 기법이 정한 설계구역 내에서 근사 최적설계를 점진적으로 수행하는 기법이다. 점진적 이차 표면 방법은 회귀계수를 결정하기 때문에 근사 함수를 구성하기 위해 추가적인 해석 시간이 필요하지 않은 장점을 가지고 있다.

4.3 최적설계 결과

Fig. 10 은 기존의 캠 윤곽과 최적화를 통하여 나온 윤곽을 비교한 결과를, Fig. 11 은 최적화된 모델의 회전각에 따른 반경 R 에 대하여 기존 모델과 비교한 결과이다. Fig. 12 는 기존 모델과 최적화된 모델의 응답을 비교하고 있는데, 최적화된 캠 윤곽에서 래치가 물리는 구간이 길어진 것을 보여준다. Table 3 에 기존 캠 대비 최적화된 캠 구동시의 목적함수 및 제약 조건 만족에 대한 변위 응답 비교 결과를 수치적으로 나타내었다.

최적설계 결과, 래칭이 발생하는 구간에서의 유지 시간을 최대화하는 것은 기존의 유지시간인 13ms 에서 20ms 로 약 8ms 증가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 스프링 조작기를 가진 차단기의 캠 윤곽 최적설계를 통해 기존의 구동 성능을 만족하고 오픈 샤프트가 래칭에 걸리는 래칭 구간에 대한 메커니즘의 안전성을 확보하고자 가동부의 변위 응답 중 래칭이 발생하는 구간에서의 유지 시간을 개선하는 것이 수행되었다. 차단기 모델의 동특성을 파악하기 위해 ADAMS 를 이용한 다물체 동역학 모델이 개발되었다. 시험 결과와의 비교를 통해 메커니즘의 신뢰성을 확보하였다.

검증된 다물체 동역학 모델을 기반으로 최적설계 프로그램 PIANo 를 사용하여 최적화가 이루어졌다. 캠 윤곽 최적화에서 사용된 캠 윤곽의 설계 변수는 가동부의 변위 응답 특성을 나타내는 캠의 처음과 끝점을 제외한 중간 구간을 변수로 두었다. 특성 분석의 용이성 및 변곡 구간을 줄이고자 총 4 개의 설계점이 사용되었다. B-spline 보간법을 이

용해 캠 윤곽을 형성하였으며, PIANO의 실험계획법 민감도 해석을 수행한 결과를 바탕으로 설계변수의 범위를 각각 조정하여 최적화가 진행되었다.

최적설계 결과, 차단 메커니즘 작동 시 래칭 구간에서의 유지 시간이 기존 대비 8ms 증가되었다. 또한, 제약조건으로 사용되었던 구동 속도 또한 기존 모델 대비 향상 되었다. 이 결과를 바탕으로, 메커니즘의 안전성 향상 및 성능을 개선할 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유 과제 학술 연구비(2년)의 지원에 의하여 연구되었으므로, 지원기관에 감사 드립니다.

참고문헌

(References)

- (1) Sohn, J. H., Lee, S. K., Kim, S. O. and Yoo, W. S., 2007, "Study of Spring Modeling Techniques for Kinematic and Dynamic Analysis of a Spring operating Mechanism for the Circuit Breaker," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.31, No.7, pp.777~783.
- (2) Lee, S. K., Kim, S. O., Yoo, W. S. and Sohn, J. H., 2007, "Study on the Spring Modeling of Circuit Breaker with Spring Operating Mechanism," *KSME Spring Conference*, Vol. 2007, No. 5, pp. 2171~2176.
- (3) Choi, G. S., Cha, H. K., Sohn, J. H. and Yoo, W. S., 2014, "Optimum Latch Contour Design for Improving Gas Circuit Breaker Performance," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.38, No.1, pp.25~30.
- (4) Jang, J. S., Yoon, C. G., Ryu, C. Y., Kim, H. W., Bae, B. T. and Yoo, W. S., 2015, "Optimization of the Switch Mechanism in a Circuit Breaker Using MBD Based Simulation," *The Scientific World Journal*, Vol. 2015.
- (5) Kim, J. H., Ahn, K. Y., Kim, S. H. and Lee, D. G. and Kwak, Y. K., 1998, "Design of the Cam Used in Power Circuit Breaker with Non-Constant Angular Velocity" *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, pp. 692~697.
- (6) Kim, J. H., Ahn, K. Y., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., 2001, "Optimal Design of a Variable-Speed Cam for Power Circuit Breaker," *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp.47~53.
- (7) Yoo, W. S., Kim, S. O. and Sohn, J. H., 2007, "Dynamic Analysis and Design of a High Voltage Circuit Breaker with Spring Operating Mechanism," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.21, No. 12, pp.2101~2107.
- (8) Jang, J. S., Sohn, J. H. and Yoo, W. S., 2011, "Optimization of the Cam Profile of a Vacuum Circuit Breaker by Using Multi-body Dynamics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.35, No.7, pp.723~728.
- (9) ADAMS User's Guide, MSC Software Corporation, 2005.
- (10) PIANO User's Guide, PIDOTECH, 2004.
- (11) MATLAB User's Guide, MathWorks, 1984.
- (12) Choi, J. H., Jung, S. I., Park, J. B., Lee, J., Hong, K. J. and Choi, D. H., 2002, "The Optimal Design of Switched Reluctance Motor Using Progressive Quadratic Response Surface Method," *KIEE summer conference*, Vol. 2002, No. 7, pp. 595~597.