

회로차단기 조작기구의 래치 위치 및 길이 최적설계

차현경* · 장진석** · 유완석** · 손정현*†

* 부경대학교 기계자동차공학과, ** 부산대학교 기계공학부

Optimum Design of Latch Position and Latch Length on Operating Mechanism of a Circuit Breaker using ADAMS and VisualDOC

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

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

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

(Received February 20, 2014 ; Revised July 18, 2014 ; Accepted August 1, 2014)

Key Words: Gas Circuit Breaker(가스회로차단기), Optimum Design(최적설계), Operating Mechanism(조작기구), Latch(래치), Genetic Algorithm(유전 알고리즘)

초록: 회로차단기에서 가장 중요한 성능은 전기시스템의 이상전류를 신속하게 차단하는 것이다. 이러한 차단시간은 조작기구의 동적 특성에 의한 영향을 받는다. 따라서 회로차단기의 차단시간 단축을 위해서는 조작기구의 최적화가 이루어져야 한다. 본 논문의 가스회로차단기의 조작기는 스프링으로 구동되며 여러 개의 Latch로 구성되어있다. Latch들의 상대적 위치와 길이로 정의된 각 설계변수의 차단시간에 대한 영향을 분석하고 이 결과를 통해 설계변수를 선정하여 ADAMS와 VisualDOC의 연동을 통해 최적화를 수행하였다. Latch들의 최적화를 통해 약 22.5% 개극시간을 향상을 확인하였다.

Abstract: Breaking time is an important performance indicator of a circuit breaker. Thus, the operating mechanism of the circuit breaker should be optimized for reducing the breaking time. The operating mechanism in a gas circuit breaker is made up of several latches. Specifically, the geometry and relative positions of latches influence the dynamic behaviors of the operating mechanism. In this study, a three-stage latch operating mechanism is analyzed on the basis of the verified multibody dynamics model constructed using the MSC.ADAMS program. The relative positions and lengths of latches are selected as design variables. The dominant design variables are selected by a design study. Optimization is performed using a genetic algorithm (GA). The study results demonstrate that the performance of the circuit breaker improves by about 22.5%.

1. 서론

전기는 우리 생활에서 없어서는 안 될 에너지원이다. 전기의 공급으로 인해 생활이 윤택해진 만큼 전기를 적절하게 공급하고 차단하는 일 또한 중요해졌다. 회로차단기(이하 차단기)란 정격전류 이상의 전류가 흐를 때 이로 인한 사고를 방지하기 위해 회로에 전류의 흐름을 차단하는 장치이다.

차단기에서는 신속하게 전류를 차단하는 것이 중요하기 때문에 차단시간이 짧을수록 성능이

우수한 차단기가 된다. 차단기는 접점이 벌어져 발생하는 아크(Arc)의 소호를 담당하는 차단부(Interrupter)와 접점 및 차단부를 구동시키는 조작부(Mechanism)로 나뉜다. 또한 차단시간은 조작부의 동작시간인 개극시간(Opening time)과 차단부의 동작시간을 나타내는 아크 소호시간(Arc extinguishing time)으로 나눌 수 있다. 차단기의 개극시간을 단축시키기 위한 조작기구 설계에 관한 연구 사례로, 안⁽¹⁾은 스프링 구동 방식으로 링크와 캠 기구를 가진 진공회로차단기에서 구동 캠의 마찰과 구동 스프링에 대한 분석을 통해 최적설계에 관한 연구를 하였고, 장⁽²⁾은 진공회로차단기에서 캠 윤곽 최적화를 통하여 차단속도를 향상시켰다. 또한 최⁽³⁾

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 가스회로차단기의 Latch 접촉부분의 윤곽 최적 설계를 통해 성능을 향상시켰다.

본 논문에서는 시험을 통하여 검증된 동역학 모델을 기반으로 가스회로차단기의 조작기구를 구성하고 있는 여러 개의 Latch 의 위치 및 길이를 최적화함으로써 조작부 전체 형상을 다루었다. 이어지는 2 장에서는 조작기구의 동적 해석을 위한 모델링에 관해 다루었고, 3 장에서는 개극시간에 영향을 미치는 주요 변수를 선정하는 과정을 다루었으며, 4 장에서는 선정된 설계변수를 최적화하기 위해 ADAMS 와 VisualDOC 의 연동모델 구성과 최적화 결과를 나타냈으며, 끝으로 5 장에 결론을 정리하였다.

2. 조작기구의 동역학 모델링

2.1 조작기구의 메커니즘

Fig. 1 은 가스회로차단기의 조작기구와 각 명칭을 나타내었다. 본 가스회로차단기의 주요 부품으로, 스프링타입의 구동방식으로써 미리 충전된 탄성에너지로 시스템의 정적 평형을 유지시켜주는 차단스프링(open spring), 이상전류를 감지하고 조작기구의 트립을 담당하는 솔레노이드(solenoid), 솔레노이드의 작은 힘으로도 트립이 가능하도록 하는 3 개의 래치(latch), 정상전류가 흐를 때 투입동작의 구동 역할을 하는 캠(cam)으로 구성된다.

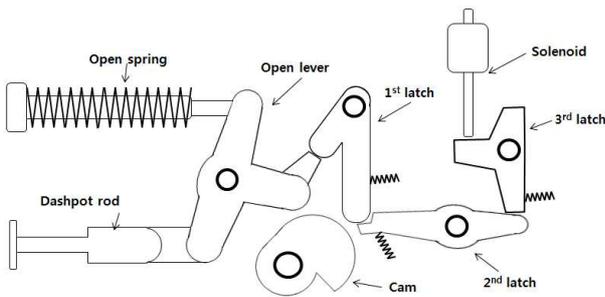


Fig. 1 Operating Mechanism of a circuit breaker

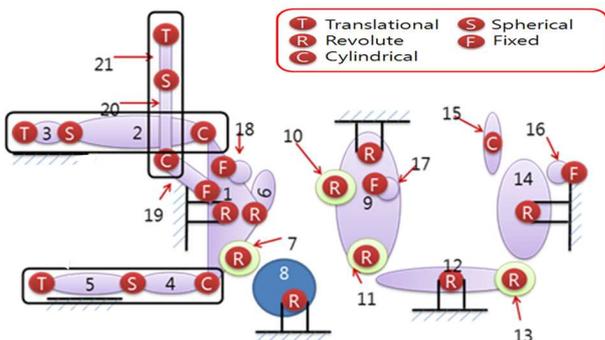


Fig. 2 Schematic diagram of a circuit breaker

Fig. 2 는 조작기구의 동역학 해석 모델에서의 각 부품들과 조인트 연결을 나타내었다. 동역학 해석을 위해 차단부를 제외한 조작부의 기구만을 모델링 하였으며, 총 22 개의 강체로 구성되어있고 총 12 자유도를 가진다. Table 1 에 시스템의 자세한 연결상태를 정리하였다.⁽³⁾

2.2 차단동작 메커니즘

본 가스회로차단기는 스프링 구동방식으로 압축되어있던 스프링의 큰 탄성에너지가 차단레버(open lever)와 1st latch, 1st latch 와 2nd latch 그리고 2nd latch 와 3rd latch(Fig. 1 에서 명칭 참고)가 접촉을 유지하도록 한다. Fig. 3 에 차단스프링의 압축력의 방향과 latch 에 작용하는 접촉력의 방향을 화살표로 나타내었다. Hertz Contact 이론에 따른 접촉 모델을 적용하였으며, latch 형상에 따른 접촉 모델을 만들기 위해 “Curve to curve” method 를 사용하여 모델링 하였다.

Fig. 3 은 정상상태로써 현재 회로내에 정상전류가 흐르는 상태이다. 이 상태에서 회로내에 이상전류를 감지하여 solenoid 가 수직방향으로 운동(①)을 하여 3rd latch 와 접촉을 하면서 조작기구가 트립을 하게 된다. Fig. 4 에서는 차단 동작 시에 조작기구의 동작을 나타내었다.

Table 1 The degree of freedom of a circuit breaker

item	Number	Coordinates
Body	22	6
Ground	1	-6
Revolute joint	10	-5
Cylindrical joint	4	-4
Spherical joint	3	-3
Translational joint	3	-5
Fixed joint	4	-6
		12degrees of freedom

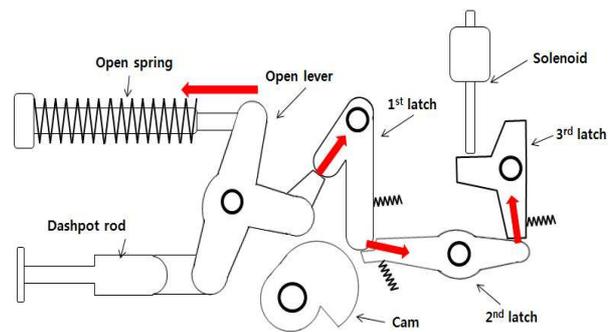


Fig. 3 The direction of contact force between parts

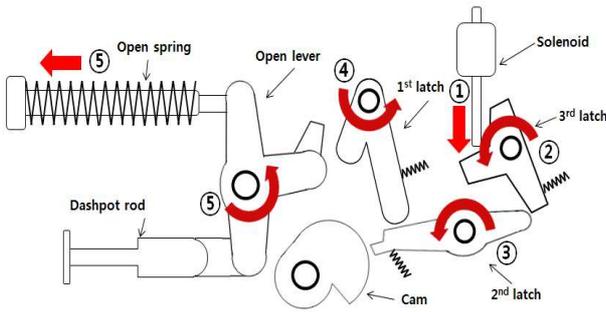


Fig. 4 The sequence of opening operation

Solenoid 와의 접촉에 의해 3rd latch 는 반시계방향으로 회전을 하고(②), latch 들간의 접촉력이 모멘트를 발생시켜 차례로 2nd latch(③), 3rd latch(④)가 반시계방향으로 회전을 한다. 이로써 Open spring 의 탄성에너지가 Open lever 의 운동에너지로 전환되면서(⑤) 차단부의 접점을 해제하게 된다.

3. 설계 변수 선정

3.1 설계에 영향을 미치는 인자

차단기 개극시간은 조작부의 주요 부품인 세 개의 latch 에 의해 크게 좌우됨으로 1st latch 의 자세를 A_1 , 1st latch 길이를 L_1 , 1st latch 로 부터의 2nd latch 의 자세를 A_2 , 2nd latch 의 회전중심점을 기준으로 좌측과 우측의 latch 길이를 각각 L_2 , L_3 , 두 길이의 사잇각을 A_3 , 그리고 2nd latch 로부터의 3rd latch 의 자세를 A_4 , 3rd latch 길이를 L_4 로써 총 8 개의 설계인자를 선정하였다.

이를 표현하기 위해 Fig. 5 와 같이 각 latch 의 회전중심점의 위치 및 주요하드포인트를 나타내었다.

점 O 는 1st latch 의 회전중심점을, 점 A 는 1st latch 의 끝점을, 점 B 는 2nd latch 의 회전중심점을, 점 C 는 2nd latch 의 끝점을, 점 D 는 3rd latch 의 회전중심점을 각각 나타내었다. 점 E 는 3rd latch 와 solenoid 가 접촉하는 지점의 수직방향과 점 D 의 수평방향으로의 교차지점을 나타낸 것이다.

Fig. 6 은 Fig. 5 에서 나타낸 하드포인트를 기준으로 latch 들의 상대적인 자세와 길이를 표현한 8 개의 설계인자의 표기법을 나타내었다. 점 O 에서 점 A 까지를 L_1 , Open lever 와 점 O 까지 거리선과 L_1 의 사잇각을 A_1 , 점 A 에서 점 B 까지지를 L_2 , L_1 과 L_2 의 사잇각을 A_2 , 점 B 에서 점 C 까지지를 L_3 , L_2 와 L_3 의 사잇각을 A_3 , 점 C 에서 점 D 까지지를 L_4 , L_3 와 L_4 와의 사잇각을 A_4 로 표기하였다. 각도는 반시계방향을 (+)방향으로, 길이는 이전 기준점에서 그 다음 점의 방향을 (+)방향으로 지정하였다.

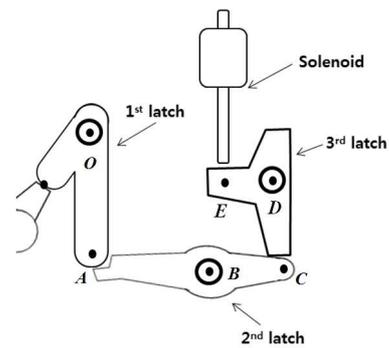


Fig. 5 The latch part of operating mechanism

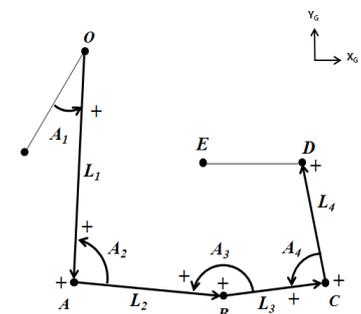


Fig. 6 The notation of design variables

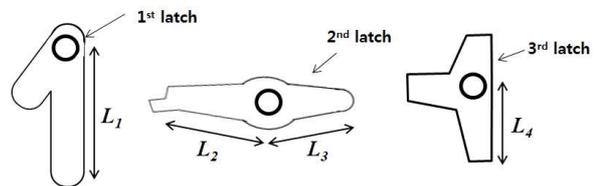


Fig. 7 The geometry of latch

이로써 설계에 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계인자들이 모두 반영되도록 하였다.

3.2 질량 및 관성모멘트 효과를 고려한 모델링

각 latch 의 길이를 설계인자로 설정함으로써 길이변화에 따른 latch 의 질량 및 관성모멘트의 변화가 latch 의 거동에 영향을 주기 때문에 그에 따른 모델링이 필요하다. Fig. 7 은 설계인자로 설정한 각 latch 의 길이를 나타낸 것이다. Latch 의 길이변화에 따라 형상(geometry)이 변하며 새로운 형상의 물성치의 변화도 반영되도록 모델링 하였다.

3.3 민감도 분석 및 설계변수 선정

앞에서 선정한 설계인자와 동역학 해석 모델을 바탕으로 8 개의 설계인자의 개극시간에 대한 영향을 알아보았다. 각 설계인자의 주효과를 보기 위해 민감도 분석을 하였다. 민감도 분석을 통해

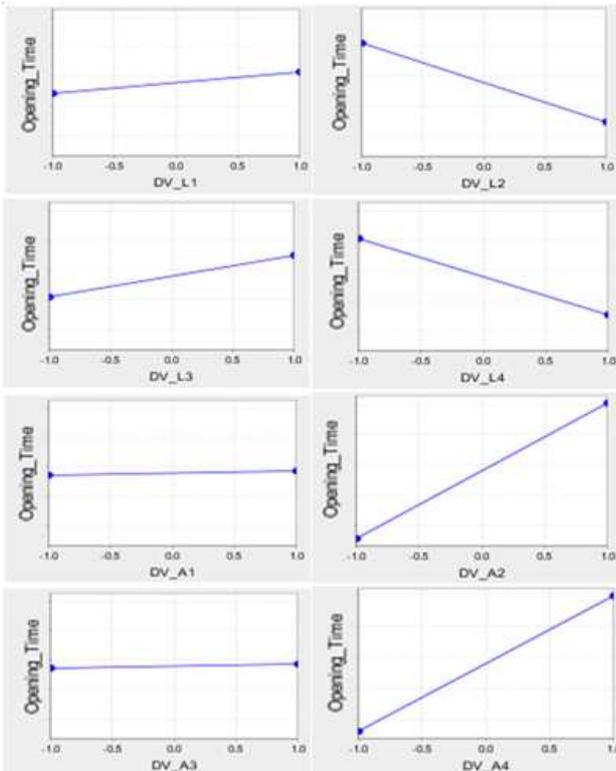


Fig. 8 Main effect of design variables

각 설계인자가 특성치에 미치는 영향의 정도를 파악할 수 있으며 특성치와의 관계가 비선형인지 선형인지 알 수 있다. 본 논문에서는 각 설계인자를 2 수준으로 나누어 개극시간에 대한 영향의 정도만 파악하였다. Fig. 8 은 8 개의 설계인자의 주효과를 나타낸 것이다. 그래프에서 기울기가 클수록 개극시간에 더 민감한 인자라 할 수 있다. Fig. 8에서 보듯이 L_2, L_3, L_4, A_2, A_4 의 5 개의 설계인자가 개극시간에 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다.

조작부의 거동특성에 큰 영향을 줄 것으로 예측했던 2nd latch 의 길이, 3rd latch 의 길이, 1st latch 와 2nd latch 와의 사잇각, 2nd latch 와 3rd latch 와의 사잇각이 주효과 분석에서도 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 이 5 개의 설계인자를 최적설계를 위한 설계변수로 선정하였다.

4. 최적설계

4.1 최적설계 문제의 정식화

앞서 제안한 차단기의 개극시간 개선을 위한 최적설계 문제를 개극시간을 최소화하는 것으로 두고 각 설계변수는 앞 장에서 분석한 결과로 선정한 L_2, L_3, L_4, A_2, A_4 5 개로 두었다. 식 (1)에 이 설계 문제를 정식화하였으며 각 설계변수의 경계치는 부품간의

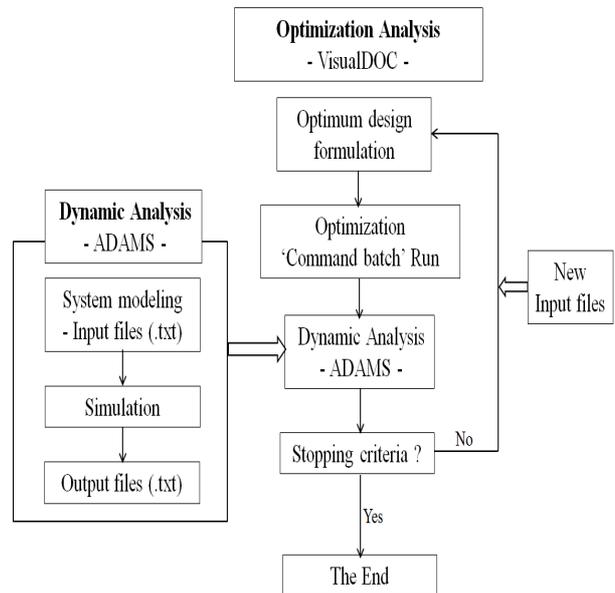


Fig. 9 Optimum design flow chart

간섭위치와 회로차단기의 closing 동작의 성공여부를 고려하여 정하였다. 또한 solenoid 의 구동력 없이 3rd latch 가 자력회전(self-rotation)하는 것을 방지하기 위해 solenoid 와 3rd latch 사이의 접촉력을 구속조건으로 두었다.

Minimize

Opening time (L_2, L_3, L_4, A_2, A_4)

Subject to

$$\begin{aligned}
 & -2 \leq L_2 \leq 15 \\
 & -4 \leq L_3 \leq 2 \\
 & -3 \leq L_4 \leq 10 \\
 & -30 \leq A_2 \leq 5 \\
 & -30 \leq A_4 \leq 5 \\
 & 0 \leq \text{Contact force } (N) \leq 10,000
 \end{aligned} \tag{1}$$

4.2 ADAMS-VisualDOC 연동모델 구성

본 논문에서는 최적설계 문제의 해를 구하기 위해 동역학 해석 프로그램인 ADAMS 와 최적화 해석 프로그램인 VisualDOC 를 연계하였다. 회로차단기의 조작기구의 동역학 모델로부터 설계변수에 해당하는 input file 로 최적설계 문제를 정식화 하고 설계변수에 따라 동역학 해석을 하고 목적함수에 해당하는 output file 을 한 번 도출하는 과정을 VisualDOC 프로그램 내에서 자동실행이 되도록 batch file 을 통해 실행시켜준다. 이와 같이 두 프로그램의 연동모델을 구성하고 최적설계를 수행하면 종료조건에 만족하기 까지, 즉 목적함수의 최소값을 찾을 때까지 설계변수를 계속적으로 바꿔가며 반복과정 거침으로써 조건을 만족하는 최적해를 찾게

Table 2 Result of optimum design

	Lower bound	Optimal value	Upper bound
L_2 (mm)	-2	15	15
L_3 (mm)	-4	-3.5	2
L_4 (mm)	-3	5.0	10
A_2 (deg)	-30	-28.5	5
A_4 (deg)	-30	-28.5	5
Reduced time (ms)	2.7		
Improved degree (%)	22.5		

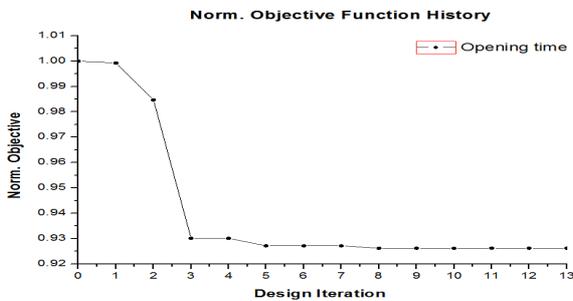
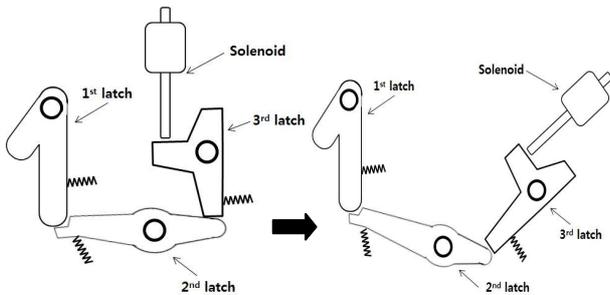


Fig. 10 History of objective function



(a) Original model (b) Optimum design model

Fig. 11 Optimum location and length of latch

된다. Fig. 9 는 ADAMS 와 VisualDOC 의 연동 해석 과정을 설명하기 위해 간단히 도시화하였다.

VisualDOC 는 실험계획법(Design of Experiments), 미분기반의 최적화 알고리즘, 반응표면법 최적화, 전역 최적화 알고리즘 등을 내재하고 있다.

4.3 GA 를 이용한 최적설계 결과

본 논문에서는 회로차단기의 개극시간을 최소화하기 위해서 VisualDOC 내의 전역 최적화 알고리즘 중의 하나인 GA(Genetic Algorithm)을 이용하였다. GA 는 유전 알고리즘으로 자연세계의 진화과정에 기초한

수학적 모델로서 1975 년 존 홀랜드(John Holland)에 의해서 개발되었다.⁹⁾ 교배율과 돌연변이율 파라미터를 적절히 조절하면 가능한 모든 해집단의 탐색이 가능한 전역 알고리즘으로써 비선형성 시스템에 적합하다. GA 에 적용한 파라미터 값들로는, 해를 찾기 위한 한 세대의 집단 크기는 100, 집단간의 교차를 나타내는 교배율은 1.00, 돌연변이율은 0.10 으로 설정하였다.

최적해를 찾는 동안의 목적함수의 수렴과정을 Fig. 10 에 나타내었다. 집단의 크기가 100 인 세대의 수를 15 번을 거친 후에 목적함수가 수렴하였고 최적해를 도출하였다. Table 2 에는 도출한 설계변수의 최적값과 최적값을 적용하였을 시의 단축된 개극시간과 개선률을 나타내었다. 각 설계변수의 최적값을 보면 2nd latch 가 회전할 때 구동부가 되는 우측은 짧아지고 좌측은 길어짐에 따라 달라지는 길이비에 의해 2nd latch 의 거동에 영향을 준 것으로 분석되며 3rd latch 또한 길이가 길어졌으며 latch 사잇각들은 증가한 결과 나왔다. Fig. 11 은 최적설계를 적용했을 시의 조작기구의 형상을 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 회로차단기의 개극시간을 단축함으로써 그 개극시간을 단축하고자 조작기구의 latch 들의 위치 및 길이를 설계에 영향을 주는 인자는 선정하였다. 설계인자에 따른 동적 특성을 분석하기 위해 길이변경에 따른 질량과 관성모멘트의 변화를 고려하여 모델링 하였다. 회로차단기의 조작기구의 전체 형상이 고려 된 8 개의 설계인자의 민감도 분석을 통해 영향의 정도가 뚜렷한 5 개의 인자를 도출함으로써, 설계변수로 설정할 수 있었다. 또한 회로차단기의 성능의 척도를 기존의 차단시간이 아닌 개극시간으로 두어 차단부와 조작부의 동작시간이 아닌 조작부만의 동작시간을 고려하여 조작기구의 최적화 해석에 대한 소요시간의 단축 효과를 가져왔다.

최적설계를 위해 다물체동역학 해석프로그램인 ADAMS 와 최적화 해석 프로그램인 VisualDOC 의 연동 모델을 구성하였다. 회로차단기와 같은 비선형 시스템에 적합한 전역 최적화 알고리즘으로 GA 를 사용하여 최적화를 수행하였다. 최적화 된 latch 의 길이와 위치를 적용하였을 시, 2.7ms 의 개극시간의 단축을 가져왔으며 이는 22.5%의 개선효과를 나타낸다.

본 논문에서는 얻은 최적설계의 결과를 토대로 향후 이를 적용한 제작을 통하여 검증이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 ㈜효성중공업 지원 하에 이루어졌습니다.

참고문헌
(References)

- (1) Ahn, K.Y., 2000, "Dynamic Analysis and Design of the Vacuum Circuit Breaker with a Spring-Actuated Linkage and Cam Mechanism," *A Doctoral thesis of KAIST*, Korea, pp. 1~120.
- (2) Jang, J. S., 2012, "Optimum Design of Spring Type Vacuum Circuit Breaker by Using Multi-Body Dynamics Techniques," A Master's Thesis of Pukyung Univ., Korea, pp. 1~69.
- (3) Choi, G. S., 2013, "Study on the Performance Improvement of Gas Circuit Breaker Using Multi-Body Dynamics Analysis," A Master's Thesis of Pukyung Univ., Korea, pp. 1~60.
- (4) Ok, J. G., 2005, "Optimum Design of A Torsion-Beam Suspension Mechanism Using ADAMS and VisualDOC," A Master's Thesis of Pukyung Univ., Korea, pp. 1~88.
- (5) 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*, 21, pp.2101~2107.
- (6) Jung, S. P., Jun, K. J., Park, T. W. and Ahn, I. C., 2008, "An Optimum Design of a Gas Circuit Breaker Using Design of Experiments," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol.36, No.4, pp.346~363.
- (7) VR&D, 2010, "VisualDOC THEORY MANUAL version 6.2.2," pp.10~70.
- (8) Jang, J. S., Sohn, J. H., 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) Kim, Y. G., Yoon, B. S. and Lee, S. B., 1997, "Meta Heuristic," Youngchi Culture publisher, pp.3~15.